



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OPTIMALIZACE TECHNOLOGIE PRO VYTVÁŘENÍ KERAMICKÝCH POUZDER

OPTIMIZATION OF FABRICATION TECHNOLOGY FOR CERAMICS PACKAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Pavlas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Skácel

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Elektronika a sdělovací technika
Ústav radioelektroniky

Student: Ondřej Pavlas

ID: 174233

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace technologie pro vytváření keramických pouzder

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti technologie vytváření keramických pouzder pro mikroelektronické aplikace. Zaměřte se na používané materiály, jejich složení a technologie přípravy. Přehledně popište získané informace v teoretickém rozboru. Na základě získaných informací navrhnete technologický postup pro vytvoření pouzdra (složení "břečky", vypalovací profil, ...).

Ze získaných předpokladů proveďte výrobu vlastního pouzdra ve vypalovací peci. Testováním vlastností (pevnost, defekty, atd.) pouzdra zjistěte vlastnosti použitých materiálu a definujte vhodnost technologického postupu výroby, popřípadě jeho úpravu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CERAMIC PACKAGING TECHNOLOGIES, 1995. [online], 1995. [Accessed 20 September 2016]. Retrieved from: <http://www.wtec.org/loyola/ep/c4s4.htm>

[2] Introduction to Ceramic Shell Investment Casting, 2015. [online], 2015. [Accessed 20 September 2016]. Retrieved from: <http://www.ransom-randolph.com/intro-to-ceramic-shell-casting.html>

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

Vedoucí práce: Ing. Josef Skácel




prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předkládaná bakalářská práce „Optimalizace technologie pro vytváření keramických pouzder“ se zabývá problematikou technologie pouzder z korundové keramiky pro mikroelektronické aplikace. Práce představuje experimentální postup výroby pouzder od lisování po výpal a jejich potisk vodivými cestami pomocí dispensního tisku rovnou kapilárou pod úhlem 45° .

KLÍČOVÁ SLOVA

Pouzdro, oxidová keramika, čip, pouzdření, integrovaný obvod, tlustá vrstva, dispensní tisk

ABSTRACT

This bachelor thesis „Optimization of fabrication technology for ceramics packages“ tackles the issues of ceramic packaging technology for microelectronics applications. This thesis deals with experimental production of ceramic packages from milling to sintering and the dispense printing with a straight capillary at an angle 45° .

KEY WORDS

Package, oxide ceramics, chip, packaging, integrated circuit, thick-film technology, dispensing

PAVLAS, O. *Optimalizace technologie pro vytváření keramických pouzder*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Skácel

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Optimalizace technologie pro vytváření keramických pouzder jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod 10

I Teoretická část

1	Technologie pouzdření v mikroelektrotechnice	11
1.1	Pouzdro	11
1.2	Dělení pouzder	12
1.3	Pouzdra pro povrchovou montáž	12
1.4	Typy vývodů	15
2	Tepelný management pouzdra	16
2.1	Ztrátový výkon a teplotní roztažnost.....	16
2.2	Přenos tepla	17
2.3	Náhradní tepelný obvod	17
3	Návrh pouzdra	19
3.1	Elektrický návrh	19
3.2	Tepelný návrh	19
4	Keramické materiály pro pouzdra integrovaných obvodů	21
4.1	Rozdělení technické oxidové keramiky podle složení	22
4.2	Korundové hmoty	23

5	Tlustovrstvé technologie	26
5.1	Tlustá vrstva.....	26
5.2	Dělení tlustých vrstev podle funkce.....	27
5.3	Dispensní tisk.....	27
6	Hlavní parametry a problematika dispensního tisku	30
6.1	Tlakové poměry	30
6.2	Vnitřní průměr kapiláry	30
6.3	Vzdálenost kapilára – substrát.....	31
6.4	Vodivá pasta Paron – W38.....	31
7	Vypalovací pec ST – 1700 MX – 1	32
8	Teplotní simulace ANSYS	34
8.1	Faktory ovlivňující teplotu uvnitř pouzdra.....	34
8.2	Výsledky teplotní simulace.....	36
II Experimentální část		
9	Technologie keramických pouzder	39
10	Inspekce keramických pouzder	41
11	Pracoviště pro dispensní tisk	43
11.1	Elektronická zařízení pracoviště.....	43
11.2	Držák pro substrát.....	44
11.3	Software SMART ROBOT EDIT.....	45
12	Kritické oblasti při testování dispenseru	48
	Závěr	51
	Literatura	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Metoda Wirebonding mikrodrátky	11
Obrázek 1.2	Metoda TAB	11
Obrázek 1.3	Metoda Flip Chip	11
Obrázek 1.4	Pouzdro SO	13
Obrázek 1.5	Pouzdro TSOP	13
Obrázek 1.6	Pouzdro QFP	13
Obrázek 1.7	Pouzdro QFP s kontaktními ploškami namísto vývodů	13
Obrázek 1.8	Běžná velikost pouzdra QFN	14
Obrázek 1.9	Běžné rozměry pouzder typu BGA	14
Obrázek 1.10	Detail kontaktů BGA	15
Obrázek 1.11	BGA – pohled z boku	15
Obrázek 1.12	Pouzdra typu LCCC	15
Obrázek 1.13	Typy vývodů pouzder integrovaných obvodů	15
Obrázek 2.1	Grafické znázornění náhradního tepelného obvodu pouzdra	18
Obrázek 4.1	Odrůdy minerálu korundu	23
Obrázek 4.2	Al_2O_3 v běžné práškové formě	24
Obrázek 4.3	Al_2O_3 stlačený ve formě kuliček	24
Obrázek 5.1	Tlustá vrstva	26
Obrázek 5.2	Odpor na čtverec	26
Obrázek 5.3	Tisk plnou jehlou	28
Obrázek 5.4	Tisk dutou jehlou	28
Obrázek 5.5	Bezkontaktní dispensing	28
Obrázek 5.6	Teplotní profil pro výpal tlusté vrstvy	29
Obrázek 7.1	Vypalovací pec v laboratoři T10	32
Obrázek 7.2	Vypalovací pec – pohled dovnitř	32
Obrázek 7.3	Sestavený teplotní profil	30
Obrázek 7.3	Teplotní profil pro obdržený materiál Al_2O_3	33
Obrázek 8.1	Základní rozměry simulovaného pouzdra a čipu	34
Obrázek 8.2	Rozměry příčného řezu pouzdra a čipu	34
Obrázek 8.3	Pouzdro s kulatými plochami na kontakty	35

Obrázek 8.4	Pouzdro s kulatými plochami na kontakty	35
Obrázek 8.5	Pouzdro s měděným kontakty na vrchní straně pouzdra.....	35
Obrázek 8.6	Teplotní mapa pro výkon čipu 0,5W	36
Obrázek 8.7	Podélný řez (0,5W).....	36
Obrázek 8.8	Teplotní mapa pro výkon čipu 1W	37
Obrázek 8.9	Podélný řez (1W).....	37
Obrázek 8.10	Teplotní mapa pro výkon čipu 2W	37
Obrázek 8.11	Podélný řez (2W).....	38
Obrázek 9.2	Pouzdro.....	40
Obrázek 9.3	Detail po frézování.....	40
Obrázek 9.4	Detail po výpalu.....	40
Obrázek 9.4	Doporučený vypalovací profil	40
Obrázek 9.5	Výsledný vypalovací profil	40
Obrázek 10.1	Povrch pouzdra	41
Obrázek 10.2	Detail po výpalu.....	41
Obrázek 10.3	Detail před výpalem.....	41
Obrázek 10.4	Detail po výpalu.....	41
Obrázek 10.5	Defekty pouzdra detekované rentgenovým zářením.....	42
Obrázek 11.1	Robot Fisnar F4200N	43
Obrázek 11.2	Dávkovací jednotka Vieweg DC 300	44
Obrázek 11.3	Vysoušecí pec Memmert UF 75 plus	44
Obrázek 11.4	Vytvořený držák pro pouzdro	45
Obrázek 11.5	Prostředí Smart Robot Edit.....	45
Obrázek 11.1	Robot Fisnar F4200N	43
Obrázek 12.1	Defekty tisku ve vnitřním rohu	48
Obrázek 12.2	Defekty tisku na vnějším rohu.....	49
Obrázek 12.3	Natisknutá vodivá vrstva před a po vysušení	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami	17
Tabulka 4.1	Výčet některých minerálů z Mohsovy stupnice tvrdosti.....	24
Tabulka 6.1	Parametry dispensního tisku	30
Tabulka 6.2	Datasheet vypalovacích past Paron.....	31
Tabulka 7.1	Parametry vypalovací pece ST – 1700 MX - I	32

ÚVOD

Důležitou součástí pokroku v oblasti mikroelektroniky je tzv. pouzdření. Pouzdra integrovaných obvodů musí splňovat požadované parametry jako je odvod tepla z obvodu, mechanickou pevnost, klimatickou a chemickou odolnost vzhledem k prostředí, musí splňovat elektrické požadavky jako je například stínění a stabilita a zároveň musí zajistit vhodné propojení čipu do systému spolu se správnou izolací mezi jednotlivými prvky. Na druhou stranu je zde pochopitelný tlak na neustálé snižování ceny.

Tedy kvalita, spolehlivost a životnost navrženého obvodu je velmi těsně svázaná s parametry pouzdra, ve kterém součástka pracuje. Proto je na pouzdření kladen tak velký důraz. Tak postupně na řadu přišla pouzdra maticová, s nevýznamnějšími zástupci jako je BGA – (ball grid array) s kuličkovými typy vývodů situovaných přímo pod samotným pouzdrem, nebo QFP – (quad flat package) a jejich dalšími modifikacemi.

Hlavním důvodem pro použití keramických substrátů namísto plastových nebo organických substrátů jsou vyšší nároky na spolehlivost realizovaného obvodu nebo vyšší teplotní či klimatické nároky. To souvisí s konkrétní aplikací nebo přímo vychází z požadavků na kýžené vlastnosti obvodu (mikrovlnné aplikace, výkonové zatížení, nutnost dostavování jmenovité hodnoty rezistorů – aktivní trimování).

Jednou z nejosvědčenějších metod technologie keramických pouzder, je lisování a výpal. Během těchto technologicky velmi náročných procesů se mohou objevit chyby a nedokonalosti ve struktuře pouzdra. Proto je nutné použít správný proces kontroly technologie. Nabízí se inspekce elektronovými mikroskopy s velkým přiblížením nebo kontrola rentgenovou tomografií.

Prvním krokem k aplikaci pouzder v mikroelektronice je potisknutí pouzdra tlustou vrstvou. Vedle například šablonového tisku nebo sítotisku, je dispensní tisk velmi přesnou a technologicky vhodnou variantou. Dispensní tisk s kapilárou ve svislém směru nad pouzdrem nakloněným pod úhlem 45° umožňuje velmi elegantním způsobem potisknout efektivněji potřebnou plochu pouzdra. Nicméně je zde několik faktorů, jako jsou oblasti rohů pouzdra, které je třeba zohlednit a s danou pastou tak experimentálně optimalizovat geometrii a strategii tisku.

I. Teoretická část

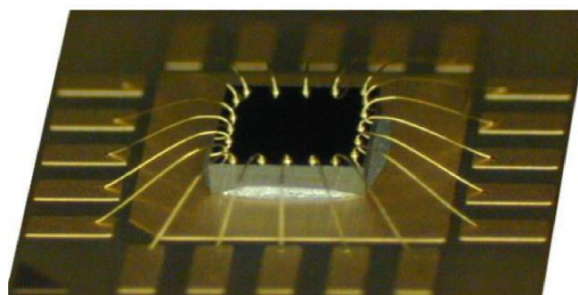
1 Technologie pouzdření v mikroeletektrotechnice

1.1 Pouzdro

Pouzdem (angl. “package“) rozumíme ochranný obal aktivní součástky, která je tvořena zpravidla jedním nebo více křemíkovými čipy. Popis pouzdra lze rozdělit na dvě základní části.

Základna, která je nosným prvkem, tedy slouží k usazení samotného čipu, a zajišťuje mechanické a elektrické propojení s deskou plošných spojů, na které je daný zapouzdrěný obvod usazen. Naprostá většina všech čipů integrovaných obvodů je s pouzdry propojena následujícími třemi typy. Při výběru jedné z těchto technologií pro danou aplikaci rozhodují faktory jako je především počet vývodů z pouzdra, vzdálenost mezi kontaktem čipu a vývodu pouzdra a další. [2] [7] [8]

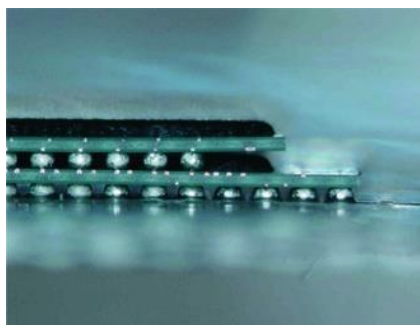
- Wirebonding - stále pravděpodobně nejběžnější metoda pro kontaktování, která je realizována hliníkovými, zlatými nebo AlSi mikrodrátky o průměru řádově několika desítek mikrometrů skládanými ve formě drátových mostů
- TAB - (Tape Automated bonding) kde jsou kontakty vytvořené na plastové fólii pomocí pružného plošného přívodu. Je však náročnější na množství potřebného prostoru
- Flip chip - kdy jsou plošky čipu osazeny kuličkovými vývody (bumpy) pomocí pájky a základna otočena lícem k DPS a kontakty se tak přímo dotýkají substrátu. Následně je prostor mezi čipem a substrátem vyplněn tzv. underfillem [2] [7] [8]



Obr. 1.1 Metoda Wirebonding mikrodrátky [4]



Obr. 1.2 Metoda TAB [4]



Obr. 1.3 Metoda Flip chip [5]

Ochranný kryt, který – jak z názvu vyplývá – slouží k ochraně součástek před vnějšími klimatickými, chemickými nebo mechanickými vlivy. Materiálem je dnes většinou keramika, kov nebo plast.

K úplnosti je však třeba dodat, že ne všechna pouzdra jsou vytvořena na této platformě základna-ochranný kryt. Kupříkladu pouzdra CC (Chip Carrier) svým způsobem slučují ochranný kryt i základnu v jeden celek, do kterého je integrovaný obvod umístěn.

[2] [7] [8]

1.2 Dělení pouzder

Pouzdra lze rozdělit do kategorií podle mnoha parametrů. Snad největší vliv na vlastnosti daného pouzdra má materiál, ze kterého je dané pouzdro vyrobeno. Podle materiálů pak můžeme pouzdra zjednodušeně rozdělit na plastová, kovová a keramická.

- Plastová (nehermetická)

Největší uplatnění nacházejí reaktoplastová pouzdra ve spotřebních aplikacích. To zejména díky jejich ceně, která může klesnout až na 1/10 ceny pouzder keramických a je tak jedním z hlavních předností použití plastu při výrobě. Pouzdřicí hmota je vícesložková směs na bázi pryskyřic, do které jsou přidávány složky jako tužidla a tvrdidla, urychlovače tuhnutí, inertní plniva, vazební složky, samozhášecí přísady, přísady potlačující pnutí, barviva a lisovací přísady. [2] [7] [8]

- Keramická a kovová (hermetická)

Důvod pro hermetické uzavření těchto pouzder plyne z jejich použití například v letecké, vojenské nebo lékařské technice, kde oproti pouzdrům plastovým vykazují mnohem větší spolehlivost a delší životnost. Další výhodou hermetických pouzder je jejich schopnost dobře odvádět teplo, takže mohou být použita i ve výkonových aplikacích. Pouzdra vyrobená z keramických materiálů vykazují lepší vlastnosti jako je hladkost a rovinnost povrchu, výborná mechanická stabilita, vysoká tepelná vodivost a teplotní stabilita. Kovová pouzdra nachází speciální využití v aplikacích, kde je vyžadováno dobré elektromagnetické stínění.

[7] [8]

1.3 Pouzdra pro povrchovou montáž

Pro různé aplikace byly vyvinuty různé plastové a keramické typy pouzder, lišící se tvarem, materiálem, rozměry, počtem vývodů, typem propojení s okolím a dalšími vlastnostmi. Kvůli pochopitelným požadavkům na miniaturizaci jsou už naprosto dominantní pouzdra pro SMT (surface mount technology – komponenty jsou vsazovány přímo na substrát) technologii, která postupně vytlačila pouzdra pro THT (through hole technology – prvky obsahují vývody, které jsou zasunuty do vodivých děr v substrátu) aplikace. Ta jsou sice stále ještě dostupná a v několika oblastech používána, ale ne ve všech moderních zařízeních je možné jejich použití. Na druhou stranu jsou vhodná pro „domácí použití“ pro svoji jednoduchou manipulaci. [7] [8]

Small Outline (SO)

Hojně užívané pouzdro staršího typu, které má vývody na dvou protilehlých stranách. Podle tvaru těchto vývodů se dále dělí na typy SO-I, SO-G, SO-J a další. [7]



Obr.1.4 Pouzdro SO [6]



Obr. 1.5 Pouzdro TSOP [6]



Obr. 1.6 Pouzdro QFP [6]

- Thin Small Outline Package (TSOP)

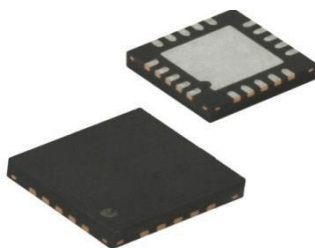
Velmi rozšířená modifikace pouzdra SO. V dnešní době oblíbené v oblasti paměťových modulů. Jeho výhody jsou malá tloušťka a relativně velké množství vývodů, vzhledem ke svému předchůdci. [7]

- Quad Flat Package (QFP)

Jedná se o typ pouzdra čtvercového tvaru s vývody na všech čtyřech stranách. To oproti SO zásadním způsobem zvyšuje množství vývodů při stejném povrchu pouzdra a také zkracuje dráhu propojovacích drátů mezi čipem a vývody pouzdra. Dnes je stále hojně využíváno pro různé ASIC čipy, jelikož dostačuje jejich potřebám. Jeho nejrozšířenější modifikací je QFN. [7] [8]

- Quad Flat No-Leads (QFN)

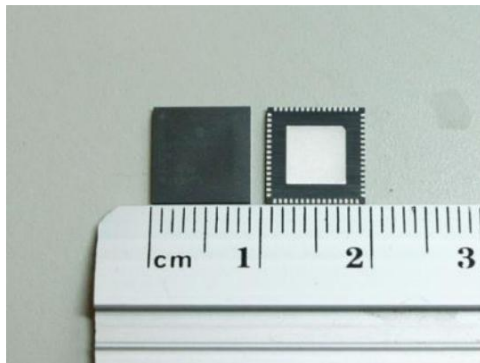
Pouzdro čtvercového typu, které má na spodních hranách kontaktní plošky. Typ „no leads“ je další cestou ke snižování rozměrů, protože pouzdro s kontaktními ploškami zabírá méně místa, než s klasickými vývody jako například u QFP. Zvýšeného počtu vývodů dosahuje druh QFP-MR (multi-row), s vývody vystavené v řadách vedle sebe na spodní straně pouzdra [7] [8]



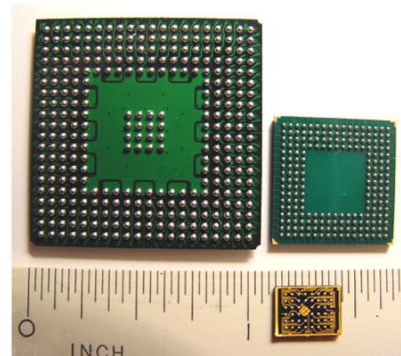
Obr. 1.7 Pouzdro QFP s kontaktními ploškami namísto vývodů [24]

- Ball Grid Array (BGA)

Čtvercové pouzdro s kuličkovými vývody na spodní straně pouzdra. Velikost pájecích kuliček se pohybuje v rozmezí od 1 mm až po desítky μm . Počet těchto vývodů může dosáhnout až několika tisíc. Je zde tedy dosaženo relativně velké integrace a miniaturizace, což zmírňuje problém se zvětšováním pouzder. Pouzdra BGA vykazují vynikající elektrické vlastnosti jako je parazitní indukčnost, kapacita nebo rezistivita přívodu ve srovnání např. s pouzdry QFP. Nejrozšířenějším typem těchto pouzder jsou plastová PBGA (Plastic Ball Grid Array). [3] [7] [8]



Obr. 1.8 Běžná velikost pouzdra QFN [9]



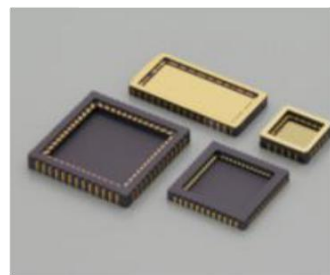
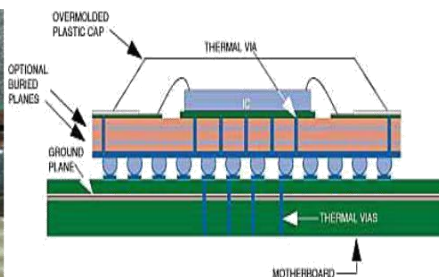
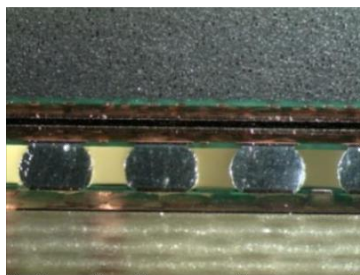
Obr.1.9 Běžné rozměry pouzder typu BGA [9]

- CBGA (Ceramic Ball Grid Array)

Pouzdro typu BGA, jehož základnu tvoří buď LTCC (Low Temperature Confired Ceramics) nebo HTCC (Hight Temperature Confired Ceramics). Chip je k základně připevněn nejčastěji metodou flip chip, případně je přikontaktován drátky (Wire Bonding). Největšími výhodami tohoto pouzdra oproti BGA nebo PBGA (Plastic Ball Grid Array) jsou mnohem lepší odvod tepla z pouzdra, vyšší hustota montáže a kratší vodivé spoje. Díky tomu může pouzdro správně fungovat se součástkami pracujícími na vyšší frekvenci nebo může být zatížené vyšším výkonem. Keramická pouzdra CBGA jsou na výrobu znatelně nákladnější, než hojně používaná plastová pouzdra, a tak se aplikují zpravidla do oblasti elektroniky vyšších tříd, kde je zapotřebných kvalitnějších parametrů součástek a potažmo pouzder. [3] [7] [9]

- LCCC (Leadless Ceramic Chip Carrier)

Pouzdra typu CC (Chip Carrier) jsou velmi podobná bezvývodovým QFN (Quad Flat No-Leads). LCCC však obsahují jiný typ vývodů, které jsou kovovými drážkami vedené zevnitř boční stranou pouzdra, kde jsou zakončeny jak na boční, tak i spodní straně. Kromě klasického připojení k DPS lze použít u pouzder CC také tzv. socket k připojení bez použití pájených spojů. [3] [7] [9]



Obr.1.10Detail kontaktů BGA[9] Obr.1.11 BGA – pohled z boku [10] Obr.1.12 Pouzdra LCCC [10]

1.4 Typy vývodů

Přehled nejběžnějšího provedení kontaktů pouzdra. Hojně zastoupený je tvar „racčích křídel“ díky mírnému namáhání materiálu vytvoření spolehlivého kontaktu. Vývody jako je vývod tvaru J zejména šetří plochou DPS,(samozřejmostí je kontakt ploškou) [7]



Obr. 1.13 Typy vývodů pouzder integrovaných obvodů [8]

2 Tepelný management pouzdra

2.1 Ztrátový výkon a teplotní roztažnost

Elektronické součástky se ochlazují přirozeným odvodem tepla, jež nastává uplatněním principů přenosu tepelné energie. Odvod tepla může být podpořen prvky, jako jsou pasivní chladiče, nebo některou z metod nuceného chlazení za pomoci mechanických větráků či termoelektrického (Peltierova) chladiče. [7]

Pro termomechanické namáhání obecně platí, že při změně teploty dochází ke změně rozměrů materiálu. Při zvýšení teploty dochází obecně k roztažení (prodloužení) materiálu a při snížení teploty pak k jeho smrštění (zkrácení). Má tedy pozitivní koeficient roztažnosti. Tento teplotní součinitel délkové roztažnosti je mírou teplotní závislosti délkových rozměrů pevného tělesa v jednotkách ($^{\circ}\text{K}^{-1}$; $^{\circ}\text{C}^{-1}$), v anglické literatuře nazývaný TCE (Temperature Coefficient of Expansion), který je definován vztahem: [7] [23]

$$\alpha, TCE = \frac{dl}{l_0} \cdot \frac{1}{dT}$$

kde: dl je změna délky (m)
 dT je změna teploty ($^{\circ}\text{K}$; $^{\circ}\text{C}$)
 l_0 je délka tělesa při výchozí teplotě (m)

K přeměně elektrické energie na tepelnou dochází při vzniku ztrátového výkonu, který se projevuje u všech pasivních prvků. Na množství uvolněného tepla ze součástky se tedy dá nahlížet jako na ztrátový výkon daného prvku. Teplota komponent má vliv na celou řadu faktorů (např. na stárnutí a tedy na životnost a degradaci materiálů), které ovlivňují spolehlivost funkce součástek a s tím také celkovou spolehlivost elektronického systému. [7]

Změna teploty celého funkčního zařízení a zejména jednotlivých prvků s sebou přináší řadu průvodních dějů, které se mohou projevit jako:

- změny parametrů obvodových prvků (*velikost odporu rezistoru, zesílení tranzistoru, změna pracovního bodu zesilovače, ...*),
- vznik termomechanického namáhání pevných spojů (*např. vznik pnutí v pájených spojkách mezi součástkami a substrátem*)
- zvýšení pravděpodobnosti vzniku chybné funkce nebo chybového signálu v polovodičovém prvku tepelnou generací nosičů,

V závislosti na druhu typu skupenství látek a přechody mezi nimi rozlišujeme tři základní druhy přenosu tepla prostředím. [7] [23]

2.2 Přenos tepla

- Kondukce (Přenos tepla vedením)

Vedení tepla zejména uvnitř pevných látek. K přenosu tepla dochází když částice v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice uvnitř látky se při tomto procesu nepřemísťují, pouze kmitají kolem svých klidových poloh. [7] [8]

- Konvekce (Přenos tepla prouděním)

Šíření tepla prouděním je způsob šíření tepla, kdy dochází k proudění hmoty o různé teplotě. Šíření tepla prouděním není možné u pevných látek, uplatňuje se pouze u tekutin (kapalin a plynů), případně u plazmatu. V kapalinách jsou k sobě částice vázány slabšími vazebními silami, tudíž dochází při dostatečném rozkmitání k přesunu molekul. Pohybem hmoty dochází k vzájemnému pohybu jednotlivých částí, které mají odlišnou teplotu a tedy různou hustotu vnitřní energie, a tím se přenáší teplo. [7] [8]

- Radiace (Přenos tepla zářením)

Při radiaci je tepelná energie látky vyzařována do prostoru ve formě elektromagnetického záření. Tento druh přenosu energie je na rozdíl od kondukce a konvekce možný i ve vakuu, tedy není k přenosu tepla zapotřebí látkového prostředí. Uplatňuje se tak i v hermeticky uzavřených pouzdrech kde je čip obklopen vakuem. Energie, přenesená radiací je závislá na teplotě tělesa, které teplo vyzařuje, na ploše jeho povrchu i na jeho barvě. [7] [8]

2.3 Náhradní tepelný obvod

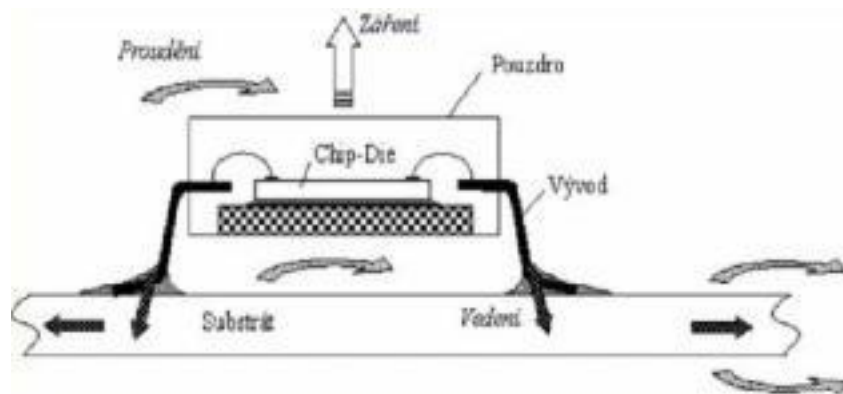
Reálný model však vypadá tak, že se všechny tyto fyzikální a chemické procesy uplatňují společně. Náhradní tepelný obvod čipu a pouzdra je v podstatě souhrn všech tepelných odporů, přes které musí generované ztrátové teplo projít na své cestě z pouzdra do okolí.

Jednotlivé části prostředí jsou zastoupena tepelným odporem, tepelnou kapacitou, zdrojem teploty a zdrojem tepelného toku. Tyto tepelné veličiny pak mají paralelu s reálnými obvodovými elektrickými parametry. [7] [8]

Tepelný obvod	Jednotka	Analogie
Teplotní rozdíl	ΔT (K)	Rozdíl el. napětí
Tepelný výkon	Φ (W)	Elektrický proud
Tepelný odpor	R (C·W ⁻¹)	Elektrický odpor
Tepelná vodivost	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Elektrická vodivost

Tab. 2.1 Analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami [8]

- Teplo generované PN přechody se šíří polovodičovým čipem do pouzdra, nebo do materiálu, kterým je pouzdro vyplněno. Následně z ohřátého pouzdra do okolí
- Jedna část proudícího tepla projde z pouzdřicího materiálu přes systém vývodů a dál přes kovové propoje do substrátu, na kterém je čip usazen. Ze substrátu přechází teplo do okolního vzduchu povrchem substrátu.
- Druhá část tepla prochází z pouzdřicího materiálu do samotného pouzdra a z jeho povrchu přímo do okolí přirozeným nebo nuceným vyzařováním popř. přes chladič [4] [5] [20]



Obr. 2.1 Grafické znázornění náhradního tepelného obvodu pouzdra [7]

3 Návrh pouzdra

3.1 Elektrický návrh

Navrhované pouzdro musí splňovat požadavky systému tak, aby byla vymezena cesta signálu a napětí vhodným způsobem. V ideálním případě by nemělo dojít k žádnému zpoždění signálu tak, aby součástka pracovala s dokonalou přesností. Realita je ovšem taková, že k malému zpoždění nebo zkreslení signálu dochází vždy, avšak tyto deformace nesmí způsobit neschopnost zapouzďřeného prvku pracovat v daném systému. Konečným výsledkem je geometrický návrh vzájemného propojení a seznam materiálů včetně jejich geometrie potřebné ke splnění systémových požadavků. Je pravděpodobné, že v budoucnu bude proces zahrnovat návrh začlenění pasivních komponent, ale i začlenění optických vlnovodů umístěných uvnitř pouzdra. [2] [3] [7]

3.2 Tepelný návrh

Tento druh návrhu pracuje s problematikou všech zatížených pasivních součástek. Ztrátový výkon se projevuje ve formě uvolňování tepla do okolí, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole. Tepelný návrh řeší tedy odvod tepla pomocí sestavení náhradního teplotního obvodu s cílem minimalizovat veškeré tepelné odpory stojící v cestě ven z pouzdra. [7]

- Ohmův zákon

Elektrický návrh zahrnuje elektrický pohyb elektronů ve vodiči. Při aplikaci pouzder je elektrická energie využívána v obou jejich základních formách a to jako stejnosměrná ss (DC - direct current) a střídavá st (AC - alternating current). Čip je napájen ss napětím, zatímco vstupní a výstupní signál čipu se mění s časem. Odpor rozptýlené elektrické energie je přeměněn v tepelnou energii, proto je nutné minimalizovat odpor vedení a odpor vodivých cest.

- Povrchový jev

SS proud teče vodičem rovnoměrně. Při vysokých frekvencích má proud tendenci se hromadit na povrchu vodiče. Toto chování je známo jako tzv. povrchový jev. Vlivem povrchového jevu je u střídavého proudu odpor vodiče větší než odpor při stejnosměrném proudu. Pro AC signály je průběh napětí a proudu sinusový a tyto průběhy mohou být mezi sebou fázově posunuty, což se projevuje jako kapacity nebo indukčnosti obvodu. Na rozdíl od odporu (způsobuje rozptyl energie) se kapacita a indukčnost chová jako akumulátor energie.

[2] [3] [7]

- Šum a přeslechy

Působení jakéhokoliv nežádoucího signálu uvnitř systému může mít za následek narušení funkce soustavy. Tento tzv. šum se může šířit z celé řady různorodých zdrojů a způsobují nechtěné zkreslení signálu. Z toho důvodu je důležitá preciznost při praktické realizaci pouzdra. Samotný elektronický systém je do jisté míry zdrojem šumu a to díky atomovému pohybu v materiálech, který je však většinou minimální. Následkem přeslechového šumu je výskyt indukovaného přeslechového signálu mezi vodiči bez jakéhokoli fyzického propojení těchto vedení. Přeslechy jsou způsobeny parazitní kapacitou a indukci. Pro omezení se používá lineární modelování přenosu signálu.

- Elektromagnetické interference

Mnoho výše popsanych vlastností souvisí s vlastní nebo parazitní kapacitou a indukčností systému. Elektrický návrh pouzdra musí zahrnovat procesy pro odhalení těchto parametrů a jejich následnou simulaci. Nežádoucí elektrické vlivy narušující parametry a zasahující do okolních systémů se nazývají elektromagnetická interference (EMI).

[2] [3] [7]

4 Keramické materiály pro pouzdra integrovaných obvodů

Jak již bylo zmíněno výše v úvodu, keramické materiály jsou před běžnějšími a levnějšími plastovými preferovány tam, kde je zapotřebí větší odolnost, vyšší životnost systému nebo je daná realizace vystavena materiálově náročným podmínkám. Typem, který je vhodný pro výrobu pouzder integrovaných obvodů je oxidová keramika. [1] [7]

Keramika je anorganický nekovový materiál s různorodou polykrystalickou strukturou, vyrobený ze směsi práškových látek, jež se po vytvarování zpevňuje žárem (výpalem). Výpalem vznikne pórovitá nebo slinutá hmota, která je tvořena krystaly, skelnou fází a póry. Podle jemnosti směsi a struktury výrobků se rozlišuje keramika jemná (např. porcelán) a hrubá (např. stavební keramika). Na výši teploty výpalu (1 000 – 1 800 °C) závisí, zda je keramika pórovitá či hutná (slinutá). Podle chemického složení, technologie výroby a aplikace v daném odvětví rozlišujeme keramiku do třech směrů: [1] [7]

- Keramika užitková

Hlavním požadavkem je pevnost, zdravotní nezávadnost, chemická odolnost a v neposlední řadě estetický vzhled. Užitková keramika zahrnuje ozdobný a figurální porcelán, ozdobnou a lidovou keramiku a jiné hrnčířské a zahraniční výrobky. [1]

- Keramika zdravotnická

Používá se v hygienických zařízeních a ve stavebnictví

- Keramika technická

Používá se v elektrotechnice, elektronice, strojírenství, hutnictví, v textilním průmyslu nebo v lékařské ortopedii jako náhrada kyčelních kloubů v endoprotézách. Vyspělá keramika tvoří základ keramických výrobků v oblasti elektroniky. Tento materiál se označuje nejen jako technická, ale také jako inženýrská nebo průmyslová keramika. Tyto termíny pokrývají mnoho různých a zčásti vysoce specializovaných keramických materiálů s jedinečnými mechanickými, elektrickými, tepelnými a biochemickými vlastnostmi a kombinacemi vlastností. [1] [7]

Tyto specifické vlastnosti mohou být dále rozvíjeny, optimalizovány a zdokonalovány pro využití v technických aplikacích. Je rovněž možné různé vlastnosti kombinovat. Podobné materiály se mohou používat při vývoji vyspělých součástí, které s optimální přesností vykonávají požadované úkoly a mohou být v příslušné oblasti použití o světelné roky napřed oproti konkurenčním materiálům, jako jsou kovy nebo plasty. Součásti vyrobené z keramických materiálů jsou v rostoucí míře jediným dostupným řešením pro technické problémy, které nelze překonat s konvenčními materiály. [1] [7]

4.1 Rozdělení technické oxidové keramiky podle složení

Jako materiál vhodný pro realizaci této práce byla vybrána korundová keramika, která je podmnožinou keramiky oxidové, která bude v následujících kapitolách stručně popsána. Oxidovou keramikou jsou myšleny materiály tvořené jedním oxidem nebo směsí několika málo oxidů. Společným znakem těchto materiálů je, že základní výchozí látkou je syntetický práškový oxid. Tyto keramiky jsou používány jak pro konstrukční tak pro funkční aplikace.

[1]

- **Steatitové hmoty**

Jde o keramiku vyrobenou ze směsi surovin, v níž je základním prvkem mastek (steatit) nebo talek ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Hlavní oblastí použití steatitových hmot je výroba konstrukčních dílů pro slaboproudou a silnoproudou techniku. Do steatitových hmot se často přidává 5-10% plastického jílu s vysokou mechanickou pevností v ohybu za sucha. Jíly zlepšují plasticitu hmoty při tavení, snižují teplotu slinutí hmoty, svým obsahem Al_2O_3 brání odskelnění taveniny. [1]

- **Forsteritové hmoty**

Hlavní surovinu forsteritové hmoty tvoří opět mastek, kdy je MgO a SiO_2 je v poměru 2 : 1. Pro zlepšení plasticity jsou aditivy jílu a kaolín. V praxi se díly z forsteritu používají hlavně ve vakuové technice pro jejich vysokou vakuotěsnost a díky tomu, že jejich koeficient teplotní roztažnosti je shodný s roztažností kovů a tvrdých pájek. [1]

- **Cermet**

Významnou skupinu v oblasti kompozitních materiálů tvoří kovokeramické materiály – cermety, složené z kovových a keramických komponentů. Cermety jsou základním materiálem pro výrobu rezistorů. Některé kovokeramické materiály představují novou kvalitu hmot z hlediska vlastností a rozšiřují významně konstrukční použití v těch aplikacích, kde již keramika nevyhovuje. Je to oblast kosmické techniky, raketové a letecké techniky, obrábění kovů a osvětlovací techniky. Cermety jsou nejčastěji připravené z vysokotavitelných kovů jako je např. wolfram (W), molybden (Mo), železo (Fe), nebo z dalších kovů (křemík – Si, titan – Ti) a jejich oxidů (oxid hlinitý - Al_2O_3 , oxid hořečnatý – MgO , oxid chromitý - Cr_2O_3). [1]

- **Mullit-korundové hmoty**

Se zvyšováním obsahu Al_2O_3 ve hmotách porcelánového typu lze překročit obsah, který může při výpalu zreagovat na volný korund. Obsah Al_2O_3 se zvyšuje přidávkou kaolínů a jílu, jejichž část se kalcinuje, aby se snížila plasticita hmoty. Je nutné použít suroviny s nízkým obsahem křemene a musí být umlety v pogumovaných mlýnech s korundovými mlecími kameny. Samotné mletí musí být provedeno na vysokou jemnost – min. pod 16.000 ok/cm^3 , aby se veškerý křemen při následném výpalu rozpustil, zreagoval s oxidem hlinitým a vytvořil

maximum krystalického mullitu. V praxi se používají tyto hmoty na výrobu konstrukčních dílů a na mlecí tělesa pro mletí hmot. [1]

- **Piezokeramika**

Keramická feroelektrika mají piezoelektrické vlastnosti. Při mechanickém namáhání (např. stlačení) destičky, která je opatřena elektrodami, se na ní objevuje elektrický náboj. Tento jev se nazývá přímý piezoelektrický jev. Nepřímý piezoelektrický jev se projevuje změnou tloušťky, jestliže piezoelektrickou keramiku vložíme do elektrického pole. Ve střídavém poli se destička rozkmitá. Piezokeramické hmoty na bázi oxidu zirkoničitého (ZrO_2) a oxidu titaničitého (TiO_2) s olovem dosáhly značného použití. [1]

4.2 Korundové hmoty

Korundové hmoty patří také do skupiny oxidové keramiky. Hlavní složkou korundových hmot je α Al_2O_3 . Oxid hlinitý krystaluje v několika modifikacích. Nejběžnější modifikace, ve které krystaluje korund je α – trigonální (klencová). [1]

- **Oxid hlinitý (Al_2O_3)**

Oxid hlinitý je krystalická látka, obvykle bílé barvy, která vzniká při spalování hliníku nebo dehydratací hydroxidu hlinitého $\text{Al}(\text{OH})_3$. Oxid hlinitý se v přírodě vyskytuje jako velmi tvrdý nerost korund. [1]

- **Korund**

Korund je nejčastěji přirozeně se vyskytující krystalická forma oxidu hlinitého. Mnohem méně běžné rubíny a safíry jsou drahokamy – kvalitní formy korundu, které vděčí za své charakteristické barvy stopám iontů barevných kovů ve své struktuře. Rubíny mají charakteristicky sytě červenou barvu díky stopám iontů chromu a jejich laserové kvality se využívají v technice (první laser vyrobený v roce 1960 používal rubín, používají se však i jiné materiály). Safíry se vyskytují v různých barevných odstínech modré a zelené a přechody mezi nimi, které jsou způsobeny příměsemi iontů železa a titanu. Odrůdy korundu jsou smirek a drahé kameny – modrý safír a červený rubín. Surovinou pro výrobu oxidu hlinitého je bauxit. [1]



Obr. 4.1 Odrůdy minerálu korundu [1]

Tvrđost	Minerál	Chemický vzorec	Absolutní Tvrđost
1	Mastek	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}$	1
2	Sůl kamenná	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3
3	Kalcit	CaCO_3	9
4	Fluorit	CaF_2	21
7	Křemen	SiO_2	100
9	Korund	Al_2O_3	400
10	Diamant	C	1600

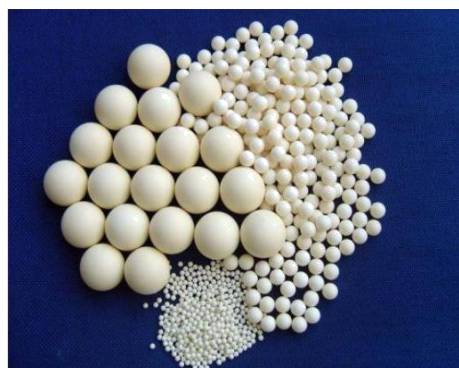
Tab. 4.1 Výčet některých minerálů z Mohsovy stupnice tvrdosti [1]

Al_2O_3 je tepelně velmi odolná sloučenina, která má ovšem amfoterní povahu, tzn. mohou reagovat jak s kyselinami, tak s hydroxidy. Díky svojí netoxicitě se využívá jako plnivo do látek denní potřeby, slouží jako katalyzátor, díky vysoké tvrdosti se používá jako abrazivo a hlavně je meziproduktem při výrobě hliníku z bauxitu. [1]

Oxid hlinitý je vytvářen ve formě bílé práškové látky. Ve vodě je nerozpustný, ale bobtná za vzniku hydroxidu hlinitého. Oxid hlinitý má amfoterní povahu, působením kyselin se rozpouští za vzniku solí hlinitých a působením zásad tvoří hlinitany. Má vysokou teplotu tání a varu a velmi vysokou tvrdost (v Mohsově stupnici 9). [1]



Obr. 4.2 Al_2O_3 v běžné práškové formě [25]



Obr. 4.3 Al_2O_3 stlačený ve formě kuliček [25]

Modifikace α je dosahována kalcinací hydroxidu hlinitého při teplotách 1200-1550 °C podle požadovaných vlastností, zvláště měrného povrchu.

Kalcinací lze rozumět vysokoteplotní proces, ve kterém se jeden tuhý materiál odloučí na výrobu plynu, zatímco druhý vytvoří tuhou látku. K tomu obvykle dochází při teplotě, která je nižší než bod tání obou materiálů. [1]

Snížení slinovací teploty korundových hmot se docílí malým přídavkem mineralizátorů v množství 0,5 – 2,0%. Těmi materiály jsou např.: TiO_2 , MnO_2 , CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CuO a mastek. Spékání neboli sintrování, slnutí či slinování je metoda výroby předmětů z práškových hmot jejich zahřátím na vysokou teplotu, avšak pod jejich teplotu tání, přičemž dochází k vzájemnému splynutí práškových částic. Při tomto procesu, který probíhá ve vakuové peci, dochází k přetváření tvarových dílů. Snížení slinovací teploty tedy ulehčuje proces výroby pouzder. [1] [2]

- **Kalcinace oxidu hlinitého**

Při kalcinaci reaktivních Al_2O_3 nastává změna povrchu ve dvou fázích. V první fázi do 1250 °C se uzavírají malé póry a jsou tvořeny větší shluky. V této fázi se mění měrný povrch.

Mezi 1250-1400 °C velmi jemné póry vymizí a póry mezi jednotlivými shluky se začnou uzavírat až nad 1400 °C. Dochází k poklesu vnějšího měrného povrchu, který pokračuje i při teplotách nad 1400 °C. [2]

- **Měrný povrch v závislosti na kalcinační teplotě**

Výška kalcinační teploty Al_2O_3 ovlivňuje nejen technologické vlastnosti, ale hlavně teplotu slinování korundové hmoty. Vyšší kalcinační teplota způsobuje vyšší stabilitu produktu, měrný povrch se mění velmi pomalu v jednotkách m^2/g . Nižší kalcinační teplota je příčinou produktu, u něhož se měrný povrch mění velmi rychle v desítkách m^2/g . Proto je výše kalcinační teploty pro korundové hmoty tak důležitá. Dnes je široká řada výrobců, kteří dodávají různě kalcinované oxidy, které se liší čistotou a velikostí částic (měrným povrchem).

5 Tlustovrstvé technologie

V mikroelektronice jsou kladeny stále vyšší nároky na integraci obvodů, což má za následek zmenšování rozměrů běžných součástek a nakonec i jejich nahrazování prvky s menšími rozměry. Zde přichází k uplatnění tlustovrstvá technologie, která je vhodná i z hlediska jednoduchosti a výrobních nákladů. Pomocí tlustovrstvých technologií lze již realizovat celou řadu prvků od vodivých propojů, kontaktů, odporů v hybridních integrovaných obvodech až po solární články. [16] [17] [18]

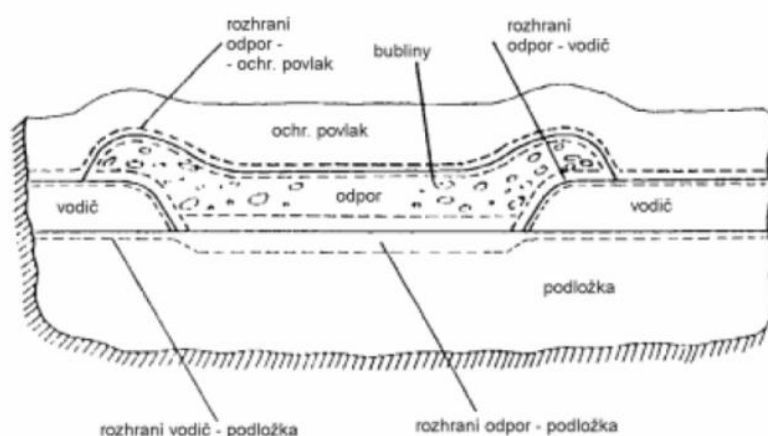
5.1 Tlustá Vrstva

Pojmem tlustá vrstva označujeme vrstvu, jejíž tloušťka je podstatně větší, než střední volná dráha elektronu. Střední volná dráha je dráha, kterou urazí částice mezi dvěma srážkami. Typická tloušťka tlustých vrstev se pohybuje v desítkách μm .

Tlusté vrstvy jsou nehomogenní směsí několika složek. Pasty pro výrobu tlustých vrstev obsahují několik složek:

- Funkční složka, zajišťuje žádané elektrické vlastnosti vrstvy, složka je tvořena oxidy či různými kovy
- Tavná složka, organická rozpouštědla a pryskyřice, které se odstraní v průběhu výpalu.
- Pojivová složka, zajišťuje přichycení funkční složky k substrátu, nízkotavná skla

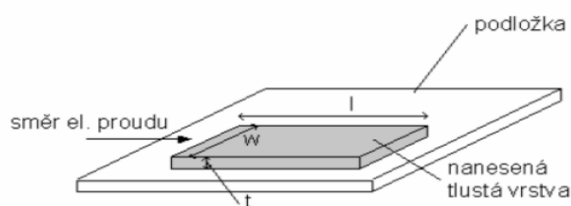
[16] [17] [18]



Obr 5.1 Tlustá vrstva [17]

Elektrické vlastnosti tlusté vrstvy

Zásadním elektrickým parametrem je vodivost nebo rezistivita (převrácená hodnota vodivosti). U tlustých vrstev se setkáváme s parametrem zvaným odpor na čtverec. Vyjadřuje velikost odporu vrstvy čtvercového tvaru (šířka vrstvy w je rovna její délce l). Tato hodnota je stanovena pro danou tloušťku t , kterou bude mít tlustá vrstva při dodržení předepsaného technologického postupu jejího zhotovení (u sítotisku určenou tloušťkou síta). [16] [17] [18]



Obr. 2.2: Rozměry tlusté vrstvy [2]

Obr 5.2 Odpor na čtverec [17]

5.2 Dělení tlustých vrstev podle funkce

Vodivé pasty

Jsou to pasty pro zhotovení vodivých tlustých vrstev. Vrstva se stává vodivou až po vypálení pasty. Vodivou složkou past jsou většinou prášky ušlechtilých kovů: stříbro, zlato, platina, paládium nebo jejich kombinace.

Odporové pasty

Odporová složka je nositelem funkčních vlastností vrstvy. Funkční složkou odporových anorganických vrstev bývají nejčastěji oxidy vzácných kovů (nap. RuO_2 , IrO_2). Typickým prvkem polymerových odporových vrstev je uhlík. Odporové pasty je možné vyrobit ve velmi širokém rozsahu hodnot odporu na čtverec, např. $10\Omega - 10^9\Omega / \square$

Dielektrické pasty

Funkční složka dielektrických past upravuje permitivitu vrstvy na vhodnou velikost. Nejčastěji se používá BaTiO_3 . Dielektrické pasty se používají pro výrobu kondenzátorů menších hodnot, které jsou integrovány do topologie tlustovrstvých integrovaných obvodů.

Izolační a ochranné pasty

Izolační a ochranné pasty neobsahují funkční složku. Izolační vrstvy se používají pro izolované křížení vodivých drah vícevrstevných struktur. Ochranné vrstvy chrání součástky před působením vnějších vlivů.

Podložky pro tlusté vrstvy

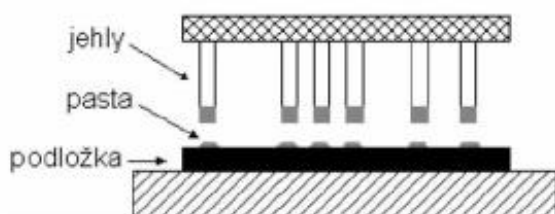
Důležitou vlastností podložek je jejich teplotní koeficient roztažnosti. Ten by měl být srovnatelný s teplotním koeficientem tlusté vrstvy. Dále by podložky měly být hladké a rovné a jejich smrštění během výpalu by mělo být zanedbatelné. Pro anorganické tlusté vrstvy se nejčastěji používají keramické podložky. Keramiky jsou většinou izolanty a mají vysokou elektrickou pevnost. Z hlediska mechanických vlastností jsou keramiky tvrdé, relativně křehké. Jsou značně odolné proti otěru. Keramika nejeví únavu a nemění tvar v závislosti na čase. Keramika odolává nepříznivým klimatickým podmínkám, není napadána mikroorganismy. Je také odolná vůči působení mnoha chemikálií. Korundová keramika (Al_2O_3) je keramika na bázi oxidu hlinitého. Je nejrozšířenějším a nejdůležitějším druhem keramiky v elektronice a mikroelektronice, protože má příznivé mechanické vlastnosti. [12] [16] [17] [18] [19]

5.3 Dispensní tisk

Dispensní tisk umožňuje tisknout vrstvy o tloušťkách v řádu desítek μm . Velkým plusem je zejména kombinace vysokého rozlišení čára/mezera, kdy je dispensní tisk po optimalizaci schopen dosahovat šířky čáry pod $100\mu\text{m}$.

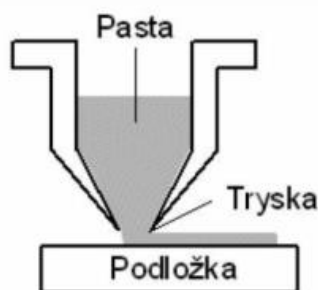
Jedná se o nanesení pasty dotykem, nebo vytlačení ze zásobníku. Používají se tři základní metody:

Plná jehla – jehla se ponoří do pasty a po vytažení se přenese na místo nanesení, kde se dotkne podložky. Metoda má malou přesnost. Pro zvýšení rychlosti se používají vícejehlové systémy. [16] [17]



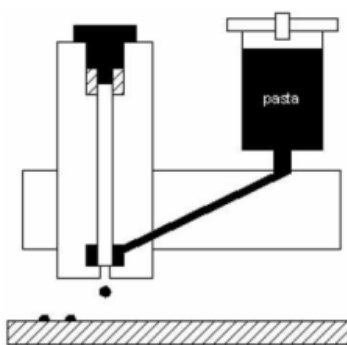
Obr 5.3 Tisk plnou jehlou [17]

Dutá jehla – Dutá kapilára s pastou se dotýká podložky v místě nanesení a vytlačí předem stanovené množství pasty pomocí požadovaného výtlačku. Nejčastěji se používá zásobník ve tvaru injekční stříkačky. [13] [14]



Obr 5.4 Tisk dutou jehlou [17]

Bezkontaktní dispensing – Pasta je na podložku vypouštěna ze vzdálenosti 1-3,5mm. Výhodou je zvýšená rychlost tisku. [13] [14]

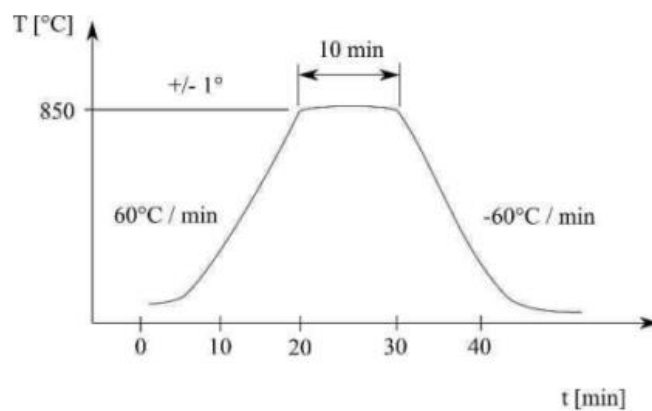


Obr 5.5 Bezkontaktní dispensing [17]

Vytvrzení tlustých vrstev

Natištěné vrstvy je třeba vypálit. Proces vypalování anorganických tlustých vrstev je náročnější než u polymerových vrstev. Anorganické vrstvy se vypalují při teplotách nad

800°C. Pro polymerové vrstvy se vypalovací teplota pohybuje okolo 200°C. Navíc je nutno při výpalu anorganických vrstev dodržet předepsaný vypalovací profil (průběh teploty během doby výpalu). [15] [16] [17] [18] [19]



Obr 5.6 Teplotní profil pro výpal tlusté vrstvy [17]

6 Hlavní parametry a problematika dispensního tisku

Vstupní parametry dispensního tisku jsou spjaty s používanými materiálem daného procesu. Nelze tak tyto parametry, které se týkají zejména dávkovaného média, nadále měnit. Cíle a požadavky, kterých je třeba dosáhnout, jsou zahrnuty ve výstupních parametrech. Vzhledem k integraci, samotným rozměrům a požadavkům na náklady a funkčnost je důležitým výstupním parametrem míra vysokého rozlišení a kvalita natisknutého produktu. Spotřeba dávkovaného média je faktorem zahrnující náklady vzhledem k používání vzácných kovů v tlustovrstvých pastách. Jedná se zejména o platínu, stříbro, zlato a další. Pouze procesními parametry lze tak při použití konkrétní pasty a substrátu dosáhnout požadovaných výstupních parametrů tisku. Správné a nejvhodnější nastavení prosených parametrů je stěžejním zaměřením praktické technologické části této práce. [15] [16] [17]

Vstupní parametry	Procesní parametry	Výstupní parametry
Dávkované médium	Tiskové zařízení	Tiskový výstup
velikost částic	vnitřní průměr kapiláry	kontaktní metoda
Viskozita	vzdálenost kapilára - substrát	vysoké rozlišení
tixotropní chování	pohyb v ose X, Y, Z	Dávkované médium
Substrát	fixace substrátu	Spotřeba
Rovinnost	tlakové poměry	
Drsnost	výšková korekce	

Tab 6.1 Parametry dispensního tisku [17]

Standardní parametry tiskového zařízení jsou:

- tlakové poměry pneumatického systému
- vnitřní průměr kapiláry
- vzdálenost kapilára – substrát.

6.1 Tlakové poměry

Základní uspořádání dispenseru je odvozeno od tlakového principu dispense. Nastavený tlak je aplikován hadičkou přes píst prostřednictvím vzduchové mezery na hladinu dávkovaného materiálu. Píst v kartuši tak podle velikosti tlaku z kapiláry vytlačuje jemu přímo úměrné množství pasty

Tímto parametrem pak lze hrubě nastavit tlak, rychlost posuvu a ostatní parametry dispenseru.

6.2 Vnitřní průměr kapiláry

Průměr dávkovací kapiláry je parametr přímo závislý na typu dávkovaného média. Médium totiž obsahuje částice, které jsou mimo jiné definovány svou maximální velikostí (parametr particle size). Vnitřní průměr kapiláry samozřejmě ovlivňuje minimální šířku tisknutelné čáry a tlak potřebný pro požadované vytékání média. Se snižujícím se vnitřním průměrem kapiláry se zvyšuje rozlišení tisku, při kterém však současně roste tlak pneumatického okruhu dispenseru. Poměr vnitřního průměru kapiláry a šířky tištěné čáry ale není se snižujícími se rozměry konstantní. Složení dávkovaného materiálu a tlak pneumatického systému dispenseru mají značný vliv na tyto poměry a se snižujícím se průměrem kapiláry (pod 100 μm) již není možné pracovat s nízkými tlaky přibližně do 3 atm.

[15] [16] [17]

6.3 Vzdálenost kapilára – substrát (odstup)

Tato vzdálenost je v souvislosti s reologickými parametry tištěných materiálů stěžejní pro bezchybný tisk (kontinuální tisk čáry se stabilním průřezem a tvarem). Pro každou pastu je potřeba určit ideální tiskovou hladinu pro daný tlak a rychlost tisku, která je ovlivňována viskozitou pasty, rychlostí tisku a tlakem dispenseru. Ve srovnání se stabilitou parametrů jako jsou tlak nebo rychlost posuvu je hodnota odstupu mnohem více problematická z hlediska její stabilizace na konstantní úrovni. Tisk s rozlišením pod 100 μm metodou tlakového dispenseru je problematický právě z hlediska odstupu tiskové hlavičky od substrátu. Tento parametr musí být udržován v optimálním poměru vzhledem k tisknutelné tloušťce vrstvy a její šířce v souvislosti s viskozitou materiálu a adhezí k substrátu. Zejména z tohoto důvodu jsou nerovnosti a zakřivení na substrátu větší než jednotky μm velkou komplikací, která může způsobit nerovnoměrné rozlití pasty na substrát nebo dokonce poškození kapiláry a tak i znehodnocení celého postupu. Vzhledem k náročnosti vypracování metodiky a potřeby mnoha různých past je vzdálenost mezi jehlou a substrátem potřeba určit experimentálně v závislosti na zkušenostech obsluhy stroje. Pokud je jehla při tisku příliš blízko substrátu, dochází k vytváření sedlovitého profilu, pokud je jehla naopak příliš vzdálená od substrátu, dochází ke kapkovitým vadám tisku. [15] [16] [17] [18] [19]

6.4 Vodivá pasta Paron – W38

K testování parametrů dispensního tisku byla použita vypalovací vodivá pasta s označením Paron – W38. Aktivní (vodivou) složkou této pasty je stříbro, které tvoří 80% celkového objemu média. Uváděná viskozita pasty je 200 Pa*s. Před výpalem pasty je třeba uskutečnit její vysušení při 150 °C po dobu patnácti minut. Samotný výpal pasty probíhá při stupních 800-890 °C [15]

PASTES FOR PIEZO/MICROWAVE PRODUCTS

Product No.	Filler	Silver Content (%)	Firing Conditions	Viscosity (Pa.s)	Comments
Paron-P96	Ag	60	750 ~ 850°C	100	Controlled shrinkage
Paron-W38		80	800 ~ 890°C	200	High Q-factor
Paron-W38A		80	830 ~ 880°C	200	High solder resistance
Paron-W38E		50	800 ~ 890°C	100	High Q-factor, Low cost

► Applications

- GPS Patch Antennas
- Dielectric Chip Antennas
- Piezo-Electric Products

► Main Features

- Piezo Products
 - Excellent solderability
 - Strong adhesion to piezo ceramics
- Microwave Products
 - High solder resistance
 - Excellent adhesion strength



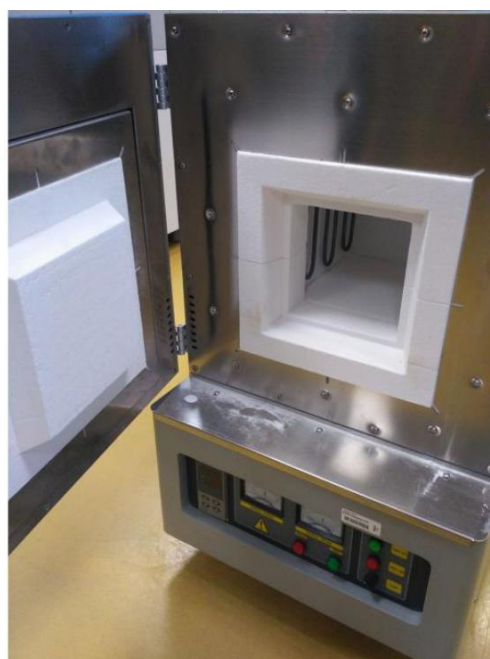
Tab 6.2 Datasheet vypalovacích past Paron [15]

7 Vypalovací pec ST – 1700 MX - I

Pro výpal vytvořených keramických produktů byla použita vypalovací pec ST – 1700 MX – I umístěná v laboratořích mikroelektrotechniky v budově T10. Vypalovací pec dosahuje maximální vypalovací teploty 1700 °C, přičemž dokáže dlouhodobě pracovat na teplotě 1600 °C, což je pro výpal keramických pouzder více než dostačující. Topná tělesa uvnitř peci jsou vyrobena z MoSi₂ a vnitřní bílé stěny, které slouží jako izolace a chrání okolí před vysokými teplotami, jsou zhotoveny z lehkého keramického vlákna oxidu hlinitého. Aby nedošlo k poškození topných těles a keramických vláken, nesmí se pec otevřít nad teplotou 300 °C.



Obr. 7.1 Vypalovací pec v laboratoři T10



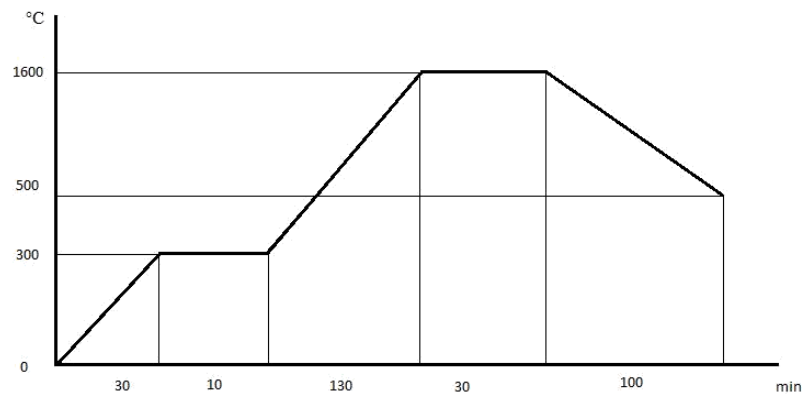
Obr. 7.2 Vypalovací pec – pohled dovnitř

Rozměry komory	150 x 150 150 mm
Maximální teplota	1700°C (méně než 3 hodiny)
Kontinuální pracovní teplota	1600 °C
Tepelná kapacita uvnitř komory	< 80 KWH
Napájení	AC, 220V; 50Hz

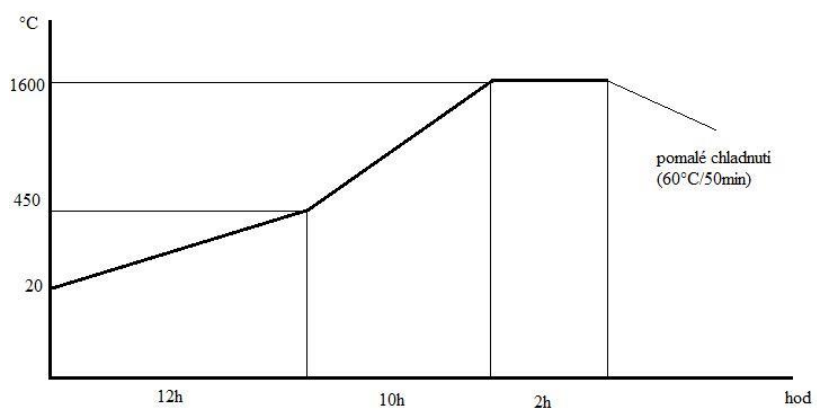
Tab. 7.1 Parametry vypalovací pece ST – 1700 MX – I [15]

- Teplotní profil

Teplotní profil je graf závislosti teploty na čase. V reálném čase je to nejvhodnější nástroj, který podává informace o průběhu procesu výpalu. Pomocí těchto profilů lze nastavovat parametry pecí, měřit kolísání zóny v jednotlivých zónách atd.



Obr. 7.3 Sestavený teplotní profil



Obr. 7.4 Teplotní profil pro obdržený materiál Al_2O_3 [14]

8 Teplotní simulace ANSYS

8.1 Faktory ovlivňující teplotu uvnitř pouzdra

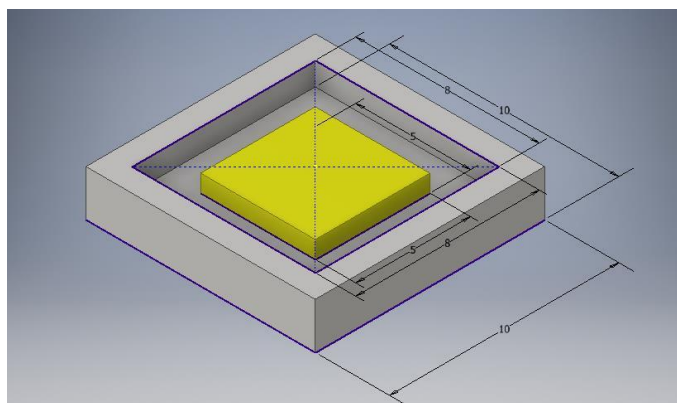
Integrované obvody pod napětím uvolňují z důvodu ztrátového výkonu do okolí teplo. Prudké nebo dlouhodobé vystavení vysoké teplotě je velmi častým důvodem defektů elektrických částí systému tedy i čipů samotných. U některých čipů je výměna nebo oprava velmi obtížný proces. Příkladem mohou být pouzdra BGA, kde je například z důvodu použití underfillu kontrola kuličkových kontaktů a stejně tak hledání poškozené části pouzdra velkým problémem. [3] [7] [23]

Nejdůležitějším faktorem je velikost pracovního výkonu zapouzdrěného obvodu.

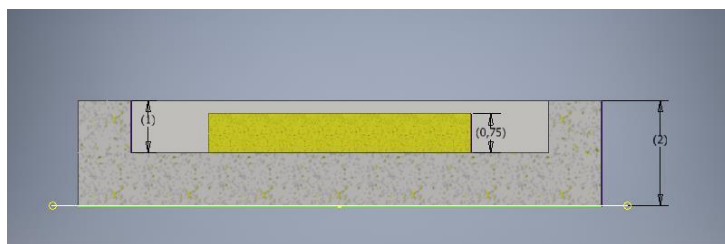
V mikročipech o rozměrech od několika milimetrů až do 2 cm lze očekávat napětí řádově v jednotkách voltů. Pro velikost proudu procházejícím čipem jsou limitujícím faktorem jeho rozměry. Pro běžné mikroelektronické aplikace plocha čipu často nepřekročí 10mm^2 . Rozměry elektronických součástek se tak pohybují do jednotek milimetrů. Aby nedošlo k poškození části od napětím, nesmí proudy u takto malých čipů překročit hodnoty řádově desítky až stovky miliampérů. [3] [7] [23]

Dalšími faktory ovlivňující správný odvod tepla z pouzdra jsou nejen materiály, jak bylo již zmíněno v předchozích kapitolách, ale také tvar, tloušťka a velikost pouzdra. Samotné rozměry pouzdra jsou kvůli miniaturizaci obvodů navrženy na nejnižší možné minimum. Velikost navrhovaného pouzdra by ideálně neměla přesahovat dvojnásobek velikosti vlastního čipu uvnitř pouzdra. [3] [7] [23]

Pro teplotní simulace byl zvolen pracovní výkon čipu postupně 0,5W, 1W a 2W a předpokládalo se samovolné proudění. Materiálem pouzdra je 96% Al_2O_3 . Zvolené rozměry odpovídají očekávaným rozměrům pouzdra tvořeného v praktické části. Konečné rozměry finálního produktu budou během dalšího testování materiálu ještě upřesněny. [3] [7] [23]



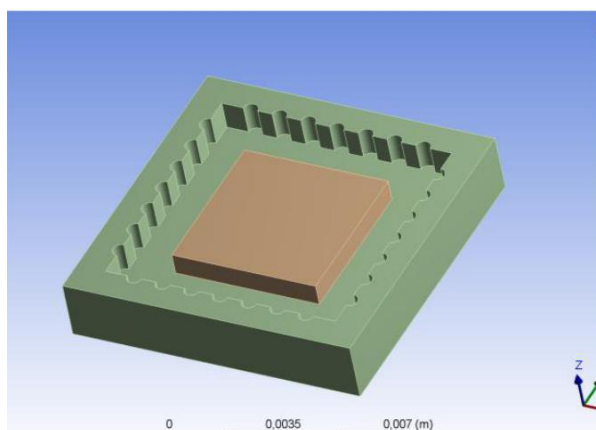
Obr. 8.1 Základní rozměry simulovaného pouzdra a čipu (v mm)



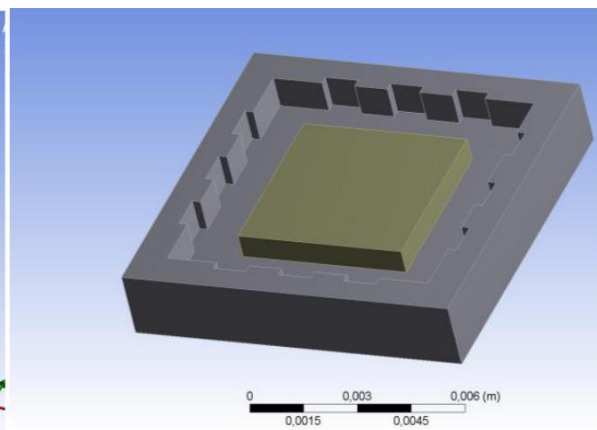
Obr. 8.2 Rozměry příčného řezu pouzdra a čipu (v mm)

Tvarové modifikace testovaného pouzdra:

Pro simulace byly vytvořeny tvary pouzder odpovídající geometrii, která bude v navazující práci použita k testování vlastností keramiky. Distribuce tepla bude v obou případech velmi podobná, jelikož jsou základní rozměry zachovány pro oba typy.

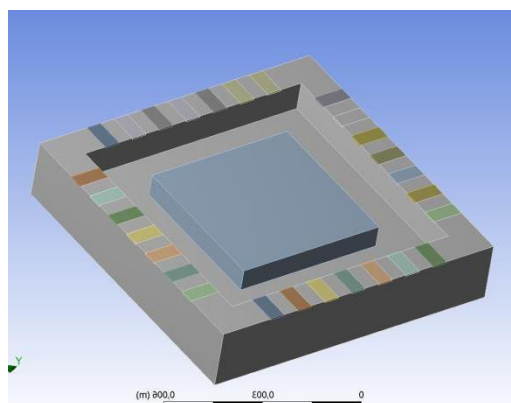


Obr. 8.3 Pouzdro s kulatými (\varnothing 0,5mm) plochami na kontakty



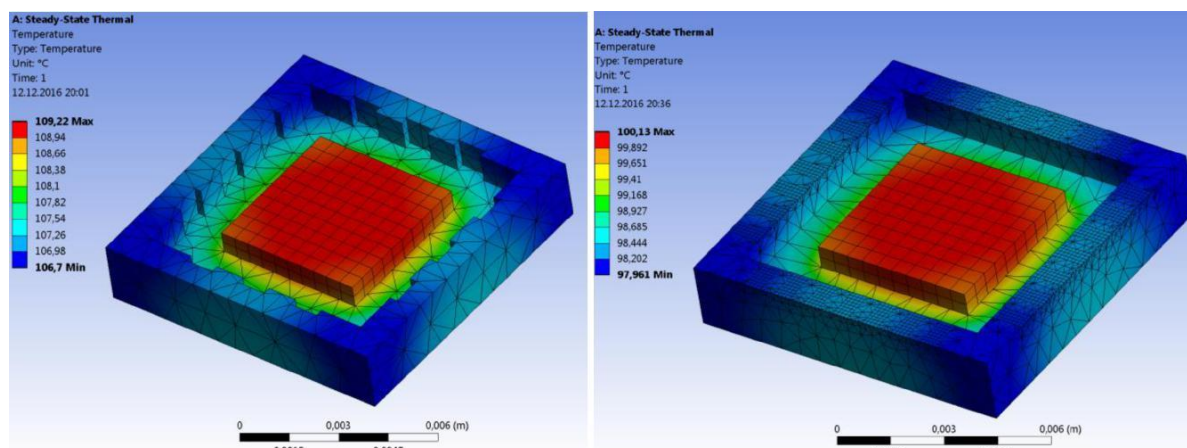
Obr. 8.4 Pouzdro s hranatými (1x0,5mm) plochami na kontakty

Třetí návrh pouzdra zahrnuje do diskuse i materiály pro kontaktování pouzdra. V tomto případě se jedná vývodové plošky na vrchu pouzdra. Materiálem ke měď, která jako kov disponuje několikanásobně vyšší tepelnou vodivostí.

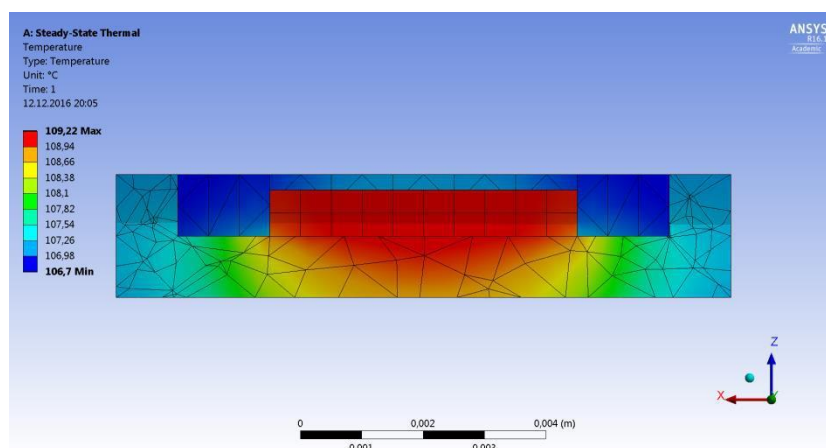


Obr. 8.5 Pouzdro s měděnými kontakty na vrchní straně pouzdra

8.2 Výsledky teplotní simulace



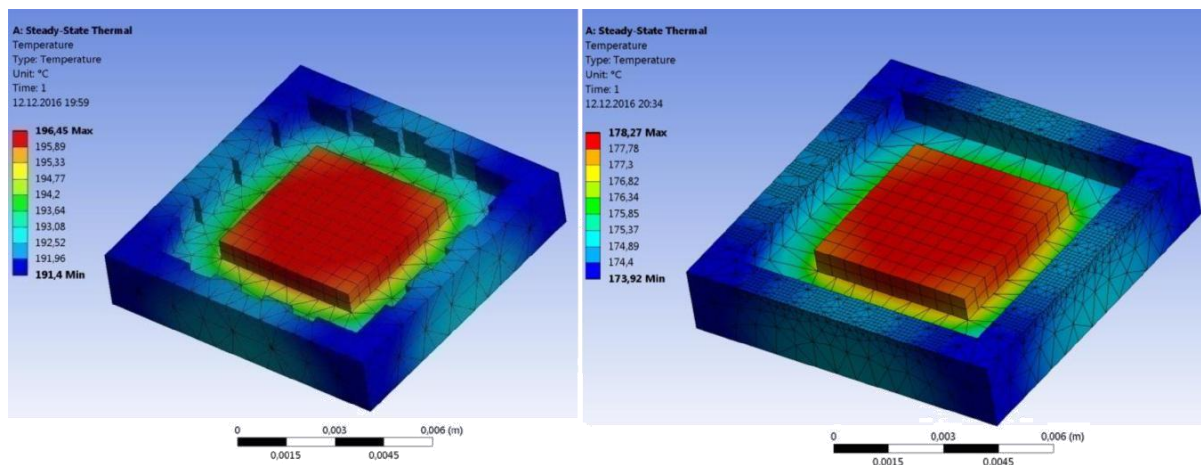
Obr. 8.6 Teplotní mapa pro výkon čipu 0,5W



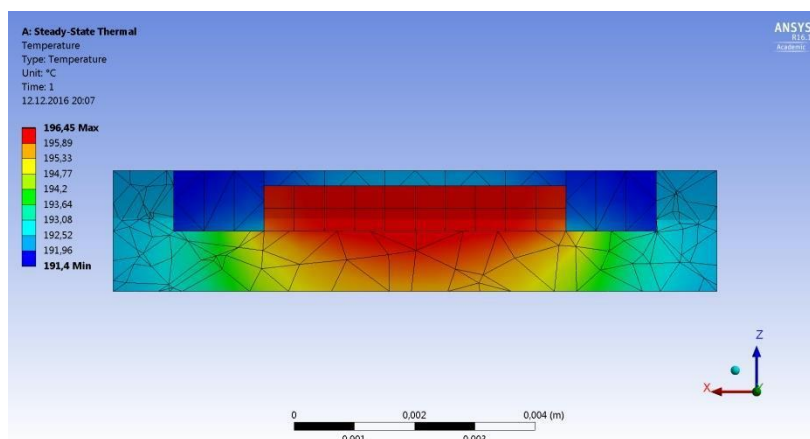
Obr. 8.7 Podélný řez (0,5W)

Při výkonu navrženého čipu 0,5W, dosahuje nejvyšší teplota hodnoty 109,22 °C. Z výsledku simulace je patrné, že tento výkon by při zachovaných rozměrech byl pro součástku vhodný, protože by nedocházelo k defektům pouzdra způsobeným přehřátím.

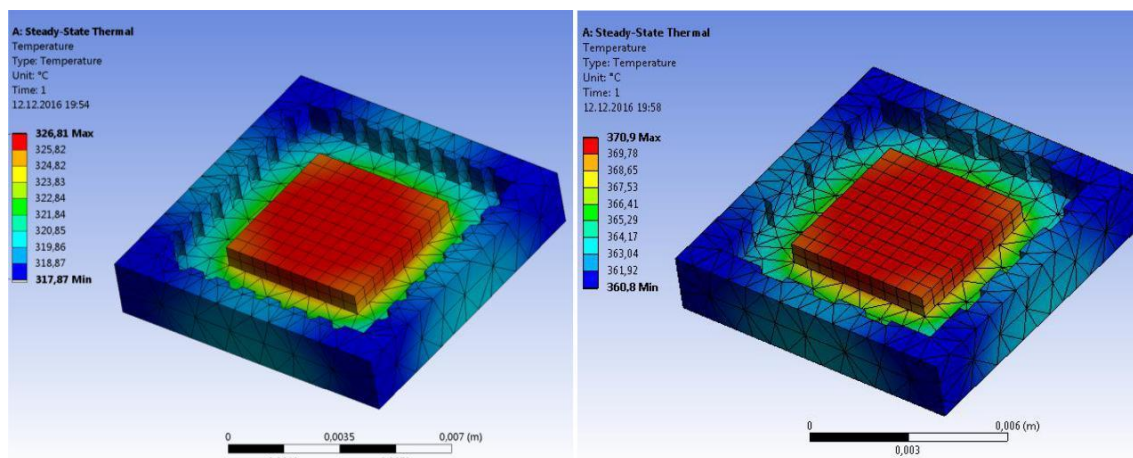
Při navýšení výkonového zatížení čipu na dvojnásobek, stoupne maximální teplota až na 196,45 °C. Při teplotě blíží se 200 °C je pro keramická pouzdra pro běžné aplikace již zapotřebí vnějšího chlazení k zamezení poškození komponent uvnitř pouzdra.



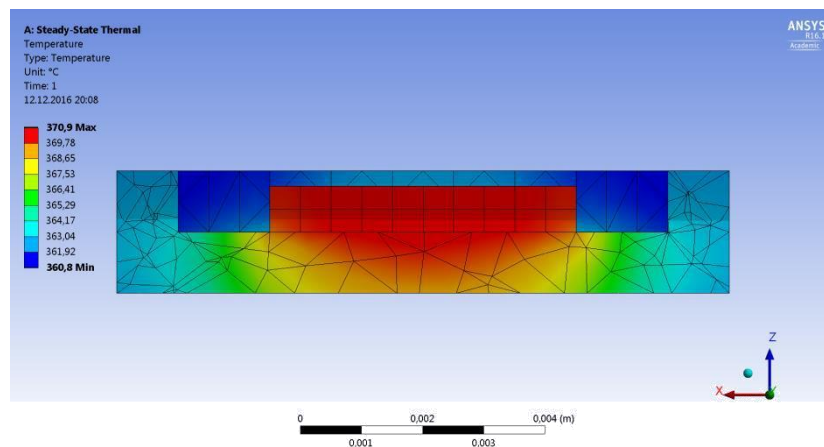
Obr. 8.8 Teplotní mapa pro výkon čipu 1W



Obr. 8.9 Podélný řez (1W)



Obr. 8.10 Teplotní mapa pro výkon čipu 2W



Obr. 8.11 Podélný řez (2W)

Při výkonu 2W dosahuje čip s ostrými hranami maximální teploty až 371 °C, výsledek simulace dokazuje, že není možné požívat toto pouzdro při výkonu čipu 2W bez přídavného chladiče. Pro výkon 0,5W maximální teplota čipu lehce překonala hranici 100 °C.

II Experimentální část

9 Technologie keramických pouzder

Pro testování pece při výpalu pouzder byl použit materiál Nabaltec 9620F ve formě prášku. Obsah tohoto prášku tvoří z 96% Al_2O_3 , zbylá 4% jsou aditiva, která se vypaří během vypalování. Vytvoření keramických pouzder je sofistikovaný, náročný proces. Hlavním problémem výpalu je scvrknutí pouzder o přibližně 10 – 20% objemu. Zvolená technologie se skládá ze dvou částí, lisování prášku a výpalu pouzdra. Zde vystává další problém, což je nákladnost nástrojů pro lisování materiálu. Lisování do formy složitějších struktur je velmi komplikované. Nejjednodušší alternativou je lisování kulatých nebo čtvercových tvarů, které jsou následně dotvarovány pomocí frézy.

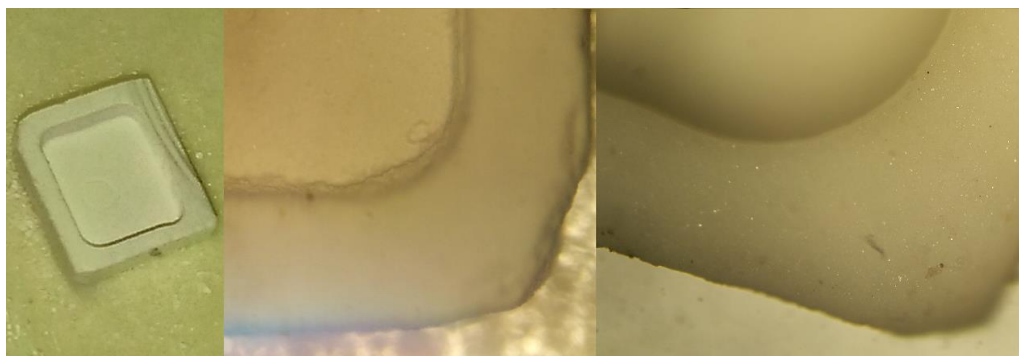
Vytvořeno bylo celkem 20 vzorků. Kvůli prověření metody výpalu byly použity vzorky různých tvarů, hmotností a rozměrů. Je důležité si uvědomit, že použitelnost v praxi nacházejí různé typy pouzder, rozličné tvarem i hmotností. Navrhovaný teplotní profil je vhodný pro keramické substráty s hmotností až ke 20g a průměrem 40mm.



Obr. 9.1 Pracoviště s frézou pro vytvoření vnitřního prostoru pouzdra

Po lisování byly vzorky frézovány do konečného tvaru. Frézování křehkého materiálu o tak malých rozměrech se ukázalo být velmi náročné, což se projevilo na úspěšnosti 85%. Zbytek exemplářů byl nenávratně poškozen. Konzistence zlisovaného materiálu byla podobná křídové. Obrázek 9.2 znázorňuje vyfrézované pouzdro s rozměry 6 x 5 x 1 mm.

Na obrázku 9.3 je znázorněn detail frézovaného pouzdra. Okraje jsou poněkud poškozené, to však nemá na funkčnost velký vliv. Na obrázku 9.4 je vidět, že frézováním poškozené okraje pouzdra jsou v dobrém stavu. Proces výpalu tak dokáže napravit drobné defekty způsobené během procesu frézování. To však není nejspolehlivější částí postupu výroby a pro lepší a přesnější výrobu pouzder je třeba využít vhodnější metody tvarování pouzder

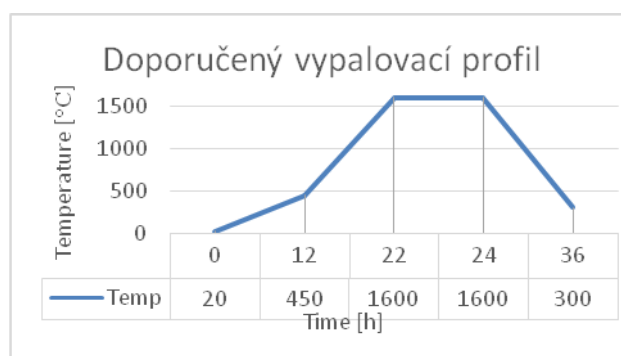


Obr 9.2 Pouzdro

Obr. 9.3 Detail po frézování

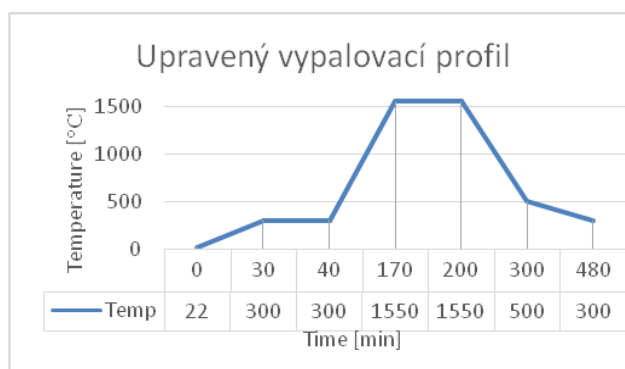
Obr. 9.4 Detail po výpalu

Vypalovací profil uváděný výrobcem je vytvořen pro velkovýrobu a velký objem materiálu. Nejdříve bylo zapotřebí nalézt vhodný vypalovací profil pro malé množství materiálu korundové keramiky a zkrátit dobu výpalu. Pro výpal byla použita pec ST 1700MX.



Obr. 9.4 Doporučený vypalovací profil [14]

Po testování několika vypalovacích profilů byl jeden vyhodnocen jako nejvhodnější. Profil je asi o 28 hodin kratší než doporučený, což byl jeden z cílů návrhu. Toho bylo možné dosáhnout díky malému množství vzorků. První částí vypalovacího profilu je stoupání teploty (22-300)°C za dobu 10 minut, která je důležitá kvůli výpalu všech aditiv. Pokud by byla příliš krátká a aditiva se tak z materiálu neodpařila, pouzdro by mohlo prasknout. Následuje fáze, kdy je po 10 minut držena hodnota teploty 300°C. Po ní přichází další teplotní zdvih (300 – 1500)°C po dobu 130 minut a dalších 30 minut na teplotě 1600°C. Poslední a nejdelší částí je fáze chlazení. Keramický materiál musí být chlazen pomalu se strmostí okolo 60°C za 50 minut. Opět platí, že po velmi rychlém chlazení by keramika mohla popraskat.

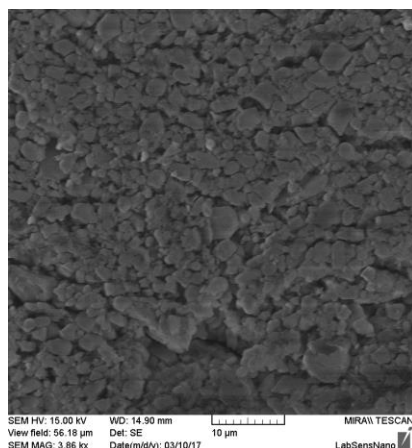


Obr. 9.5 Výsledný vypalovací profil

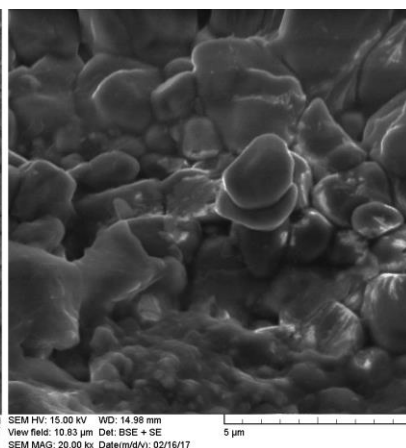
10 Inspekce keramických pouzder

Testování pomocí SEM

Pro testování výpalu keramiky byl použit elektronový mikroskop Tescan Mira (SEM). Snímky tak mohou mít šířku až 64 μ m s přiblížením 3400x. Tento typ kontroly byl zvolen, protože je dost přesný na rozeznání vhodného a nevhodného vypalování. Na obrázku 10.1 je pohled na povrch vypálené keramiky pomocí (SEM). Obrázek 10.2 ukazuje detail keramiky po výpalu.

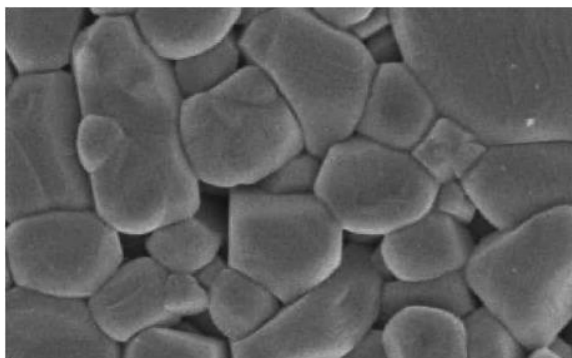


Obr. 10.1 Povrch pouzdra

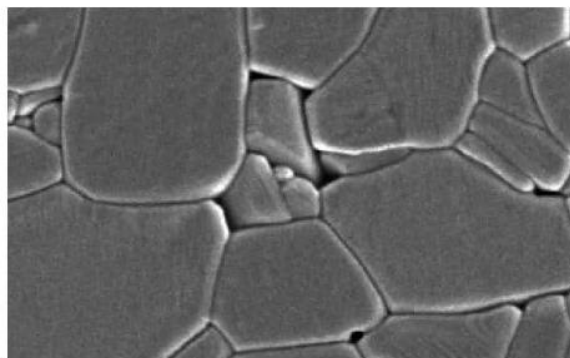


Obr. 10.2 Detail po výpalu

Na obrázku 10.3 je ve větším detailu zobrazen snímek keramiky před vypálením k porovnání s obrázkem 10.4, kde je keramika již po výpalu. Velmi dobře je zde vidět povrchová změna částic stlačeného a vypáleného prášku. Sktruktura povrchu vypálené keramiky je mnohem homogennější, jak tvoří celistvější povrch.



Obr. 10.3 Detail před výpalem

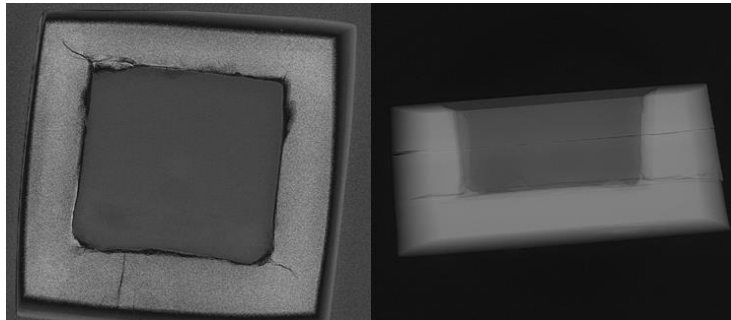


Obr. 10.4 Detail po výpalu

Inspekce defektů pomocí rentgenové tomografie

Za účelem prokázání spolehlivosti této metody pro detekci prasklin ve struktuře, bylo vybráno několik poškozených exemplářů pouzder. Použito bylo rentgenové zařízení Nordson XD7600NT, které je vybaveno Nordson DAGE NT500 uzavřenými, přenosovými, bezvláknovými trubicemi. To je běžně využíváno zejména pro detekování prázdných míst v BGA kuličkách.

Obrázek 10.5 znázorňuje pouzdra po stlačení a vypálení. Praskliny se objevily v rozích a na spodní straně pouzdra. Tento defekt byl způsoben mikro-frézováním a touto metodou detekce rentgenem je velmi dobře zaznamenanatelný. Ze snímku bočního pohledu na pouzdro vytvořené pomocí HTCC technologie je patrné, že vrstvy keramiky nebyly při lisování stlačeny rovnoměrně. Lze mezi nimi okem detekovat mezery.



Obr. 10.5 Defekty pouzdra detekované rentgenovým zářením

Pro účely detekce byly použity postupy pro vytvoření defektů. Tyto defekty mohou v mikroelektronice způsobit celou řadu problému. Keramická pouzdra jsou používána v na kvalitu náročných oblastech a takové typy chyb nejsou akceptovatelné. Proto se ukázalo jako velmi vhodné použít této metody rentgenové tomografie k detekci defektů struktur pouzder.

11 Pracoviště pro dispensní tisk

11.1 Elektronická zařízení pracoviště

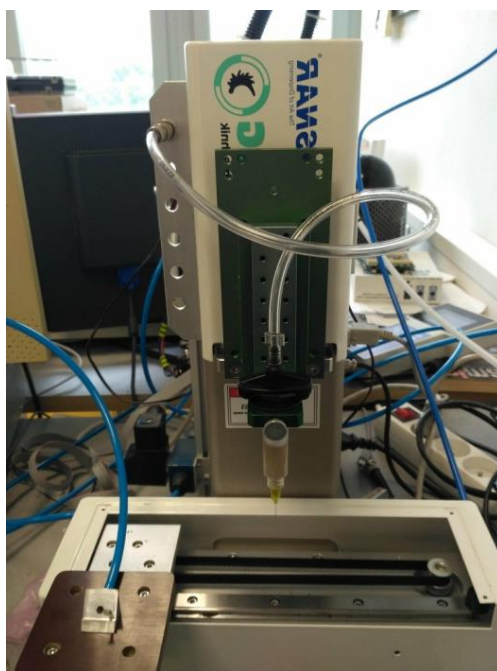
Pro praktické testování parametrů dispensního tisku bylo využito fakultní pracoviště v laboratořích mikroelektroniky v suterénu budovy T10.

Dispensní robot Fisnar F4200N

Dispensní robot Fisnar F4200N je využit s možností 3-osého polohování dispensní hlavičky. Mezi podstatné parametry tohoto dispensního robota z hlediska použitelnosti pro práci lze zařadit následující:

- zatížitelnost ramene pro pracovní stůl 3 kg
 - zatížitelnost ramene pro nástroj 1 kg
 - pracovní rozsah v osách X, Y, Z 200/ 200/ 50 mm
 - rozlišení jednotlivých posuvů 1 μm / osa
 - opakovatelnost posuvů $\pm 20 \mu\text{m}$ / osa
 - plynulý pohyb ve směru všech os
- [24]

Pomocí hadiček lze na hlavičce přivést stlačený vzduch, regulovaný dávkovací jednotkou. Hadíčka se následně přichytí ke kartuši, která obsahuje dávkovanou pastu a je k hlavičce upevněna. Ke kartuši je připevněna kapilára. Pro tuto práci byla s ohledem na rozlišení vodivých cest vybrána kapilára s vnějším průměrem 420 μm a vnitřním průměrem 240 μm . Druhá hadička s vakuem je vedena přímo k držáku na substrát, kde je vzduchotěsně nasazena na fitinku. To slouží k fixaci substrátu. K robotu jsou přidány ještě další periférie, které však při této práci nebylo třeba využít.



Obr. 11.1 Robot Fisnar F4200N

Dávkovací jednotka Vieweg DC 300

Distribuční systém tlakového vzduchu byl vybaven jednotkou Vieweg DC 300. Jedná se o programovatelný digitální dávkovač tlakového vzduchu, který má rozsah výstupu od 0 do 7 barů. Časovač lze nastavit od 0,1 do 9999 sekund.



Obr. 11.2 Dávkovací jednotka Vieweg DC 300 [17]

PC

K ovládání dispensního robota byl použit software Smart Robot Edit, který uživatelsky přívětivě spolupracuje s Microsoft Excel. To vše na operačním systému Windows XP.

Vysoušecí pec Memmert UF 75 plus

Programovatelná pec Memmert UN 75 PLUS byla použita k vysušení testovacích potisknutých substrátů. Pec s rozsahem až 300°C má nastavitelné vlastní vysoušecí profily, kdy lze nastavit parametry, jako doba náběhu, vysoušecí teplota a doba vysoušení.

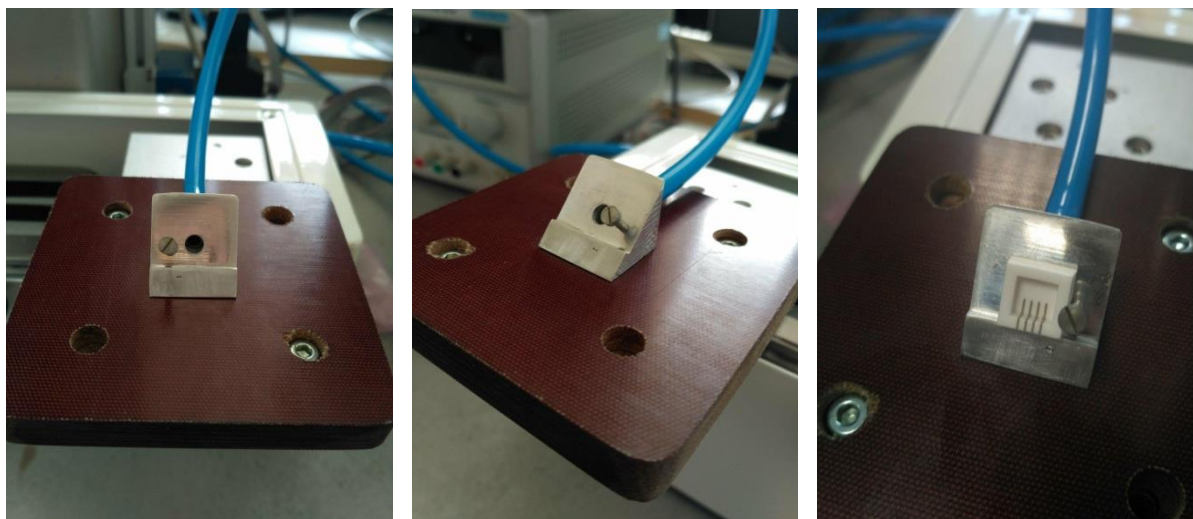


Obr. 11.3 Vysoušecí pec Memmert UF 75 plus

11.2 Držák pro substrát

Jedním z procesních parametrů, které nelze nijak zanedbat je správná fixace substrátu. Požadované rozlišení tisku je řádově v desítkách až jednotkách mikrometrů, čemuž musí adekvátně odpovídat i vlastnost držáku fixovat substrát. Pro tuto práci bylo třeba zhotovit platformu, do které lze usadit substrát čtvercové podstavy o délce strany 10 mm.

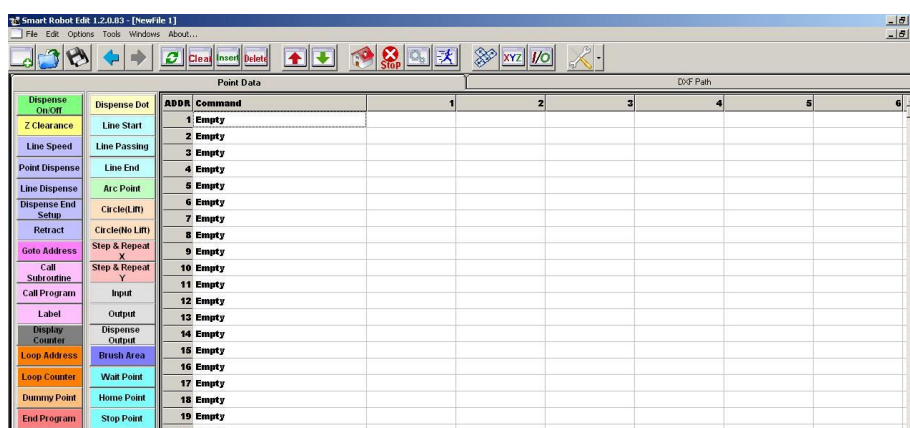
Důležitým požadavkem také bylo naklonění substrátu pro tisk pod úhlem. Naklonění bylo pro efektivitu a alespoň částečnou jednoduchost zvoleno s velikostí 45° od vodorovné osy. Stejně jako se substrátem, tak i s držákem, na kterém je toto keramické pouzdro upevněno, souvisí požadavek na co nejpresnější rovinnost. Držák se skládá z textitové podstavy, na kterou je uchycena duralová vrchní část. Její vrchní strana je seříznutá pod úhlem 45° a pro požadovanou rovinnost broušená a leštěná. Středem plochy, na které má být usazeno pouzdro je pro jeho fixaci vyvrtán otvor, kterým se lze hadičkou napojit na vakuum.



Obr. 11.4 Vytvořený držák pro pouzdro

11.3 Software SMART ROBOT EDIT

Společnost Fisnar vyvinula Smart Robot Edit Windows software ke zvýšení flexibility a pohodlí pro programování robotů série F4200N. S tímto softwarem je vytváření a editování programových dat robotu jednodušší. Stejně tak není díky propojení robota s PC nutné načítání a ukládání přes USB disk. Tímto softwarem je zjednodušena manipulace a přidávání, vkládání nebo odstraňování příkazů kódu. Níže je uveden stručný přehled vlastností softwaru, které byly použity k vytvoření programu pro tisk. [20]



Obr. 11.5 Prostředí Smart Robot Edit [20]

Smart Robot Edit je vybaven uživatelsky přívětivým prostředím určeným pro vytváření příkazových řádků a jejich parametrů. Mimo jiné i standardními operacemi pro uložení nebo načtení programu a jeho editaci. Důležitými tlačítky pro testování tisku jsou:

- HOME pro přesun souřadnic os do pozice 0 / 0 / 0
 - STOP pro okamžité zastavení chodu programu
 - TEACH/RUN pro spuštění programu v módu TEACH/RUN
 - JOG pro manuální pohyb hlavice a podložky v osách x/y/z použitím šípek a kláves PgDn a PgUp klávesnice
 - INSERT/DELETE pro vkládání nebo vyjímání příkazových řádků
 - UPLOAD pro aktualizaci dat programu přesunutých do dispensního robotu
- [20]

Příkazy pro vytvoření programu

Software Smart Robot Edit je vybaven celou řadou příkazů pro pohyb hlavice a tisk materiálu se svými parametry, z nichž bylo hned několik zahrnuto pro práci na testovaném pravoúhlém pouzdra. Zde je výčet a stručný popis použitých příkazů v – pokud možno – chronologickém pořadí.

Line Start, Line Passing, Line Stop

Těmito příkazy lze vytvořit libovolnou křivku začínající v souřadnicích definovanou Line Start, procházející jedním nebo více body určenými Line Passing, která má konec v bodě Line Stop.

Line speed

Nejlépeším způsobem, jak vytvořit požadované vodivé cesty pouzdra, je samozřejmě pomocí natisknutých linií. Rychlost pohybu hlavice robotu, potažmo kapiláry nad substrátem, je spolu s tlakem rozhodující pro množství natisknutého materiálu na substrát. Při příliš velké rychlosti dochází k nerovnoměrnému rozliti pasty tak, že se v náhodných místech z kapiláry nevytlačí dostatečné množství pro utvoření souvislé cesty. Naopak příliš nízká rychlost při stejném tlaku může způsobit rozliti příliš velkého množství materiálu, který je tak vytlačován směrem do stran od směru cesty. Tlak a rychlost pohybu hlavice s kapilárou tedy určují, jak velké množství média je nanášeno.

Line Dispense

Příkaz Line Dispense představuje nastavení parametrů pro tisk čar. Při dispensním tisku materiálů s vysokou viskozitou dochází často k časovým prodlevám mezi zapnutím dispenseru a okamžikem, kdy začne z kapiláry vytékat materiál. Parametr *Head Time* určuje dobu po zahájení dispensingu čáry, která kapiláru zabraňuje se pohnout, dokud materiál nezačne vytékat. Hrot se přemístí na místo definující začátek čáry, začne tlačení materiálu, zatímco hrot čeká na místě, po dobu určenou *Head Time* než se začne hýbat. Na konci čáry je často požadováno zpoždění po okamžiku, kdy je dispenser vypnut, aby se zbytek materiálu stihl odtrhnout od kapiláry. Zpoždění zabrání vylití materiálu na nechtěné místo při pohybu k další lokaci. Toto zpoždění se nazývá *Tail Time*.

Dispensing End Setup

Na konci tisku čáry je často vyžadováno zvednout hrot kapiláru malou rychlostí do malé výšky. To umožňuje materiálu, aby se zcela oddělil od hrotu a nerozléval se tak do míst, kde by byl nechtěný. Tato vzdálenost a rychlost, ve kterých se kapilára na konci tisku zvedne, se nazývá *Low Length* a *Low Speed*. Po přesunu do cílového bodu ve výšce *Low Length* nabízí program parametry *Z Clearance* a *High Speed*. Výška *Z Clearance* umožňuje vystoupat hrotu do takové výšky v ose z, aby se kapilára dostala nad všechny možné překážky, které by mohly být v cestě při přesunu do dalšího bodu.

Dispenser ON/OFF

Příkaz *Dispenser ON/OFF* umožňuje manuálně vypnout dispenser v definovaném bodě. To je užitečné zejména pro vypnutí dispenseru před dosažením cílového bodu aby tak bylo zamezeno vytečení přemíře materiálu na konci čáry.

Retract Setup

Funkce *Retract* dává programátorovi vysokou úroveň kontroly na konci tisknuté čáry. Umožňuje hrotu otočení směru pohybu nad tisknutou čáru nebo pohyb dopředu ve směru tisku pod definovaným úhlem. Použití instrukce *Retract* je žádoucí zejména při použití past s vysokou viskozitou nebo vláknitých materiálů. Parametry *Retract* jsou *Retract Length*, *Retract Height*, *Retract Speed* a *Retract Type*. [20]

Wait Point

Jak už je z názvu patrné, *Wait Point* v definovaném bodě pozastaví pohyb kapiláry na nastavenou dobu. To může být užitečné zejména při přechodu přes vystouplou hranu pouzdra, kam je třeba po stejné dráze kapiláry natisknout více pasty [20]

12 Kritické oblasti při testování dispenseru

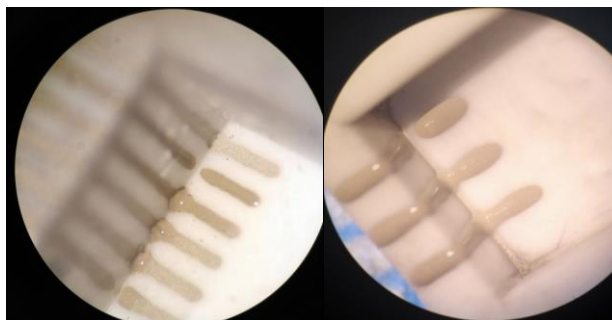
Všechny změny níže uvedených parametrů dispenseru zásadním způsobem ovlivňují výsledek tisku. Nelze však v první řadě opominout reologické vlastnosti tisknutého materiálu, v tomto případě vodivé pasty Paron-W38. Právě podle těchto parametrů je nutné testovat geometrii nebo tlak při dispensingu. Při použití každé pasty s různými vlastnostmi je třeba pracovat s jinou problematikou a tyto parametry upravovat vždy na míru danému materiálu.

Vnitřní roh

Problematika tisknutí vnitřního rohu vychází z kombinace dvou skutečností. Pouzdro je na nakloněné platformě a hrot kapiláry na něj dopadá z jediného neměnného směru. Při takto nastavených počátečních podmínkách je častým jevem nahromaděná přemíra nanášeného média právě v oblasti vnitřního rohu. Tomuto jevu přispívá i struktura tisknuté pasty, zejména její viskozita, nebo smáčivost povrchu substrátu. Pro řešení problému se naskytuje hned několik nejen softwarových cest.

Nastavení velikosti odstupu v rohu může zamezit rozlití pasty tak, že při větším odstupu má médium více prostoru mezi kapilárou a povrchem pouzdra takže není nuceno se tlačit do stran. Vyvstat však může jiný problém, kdy v blízkých oblastech kolem vnitřního rohu vznikají z důsledku zvednutí osy z nepotisknutá místa.

Passing line – Passing line. K zamezení zvýšení dlouhých křivek lze pro vnitřní roh použít dva body změny směru tisku. Tyto dva body se však musí nacházet v dostatečné blízkosti rohu, aby při přechodu hrotu nad rohem nevzniklo z rohu místo bez potisku. V tom případě lze zvolit více bodů Passing line. Nevýhodou jejich použití je časová prodleva, během které je dispenser zapnutý a kapilára stojí v jednom bodě, než se vydá dalším směrem. To opět vede k vyliší přílišného množství pasty z kapiláry. Na obrázku 12.1 jsou cesty tisknuté s různými hodnotami odstupu a tlaku, které způsobují rozlití pasty nebo naopak mezeru mezi cestami.

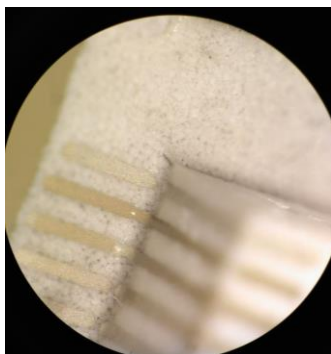


Obr. 12.1 Defekty tisku ve vnitřním rohu

Vnější roh

Problémem tisku přes vnější roh může být naopak nedostatek pasty na samotném rohu substrátu. Může tak docházet k fyzickému defektu nanesené vrstvy a nakonec zcela k zamezení průchodu proudu. Velmi snadno se dokonce může objevit nepotisknutá plocha kolem hrany dvou ploch. K dostatečnému pokrytí přelomu těchto dvou stěn je zapotřebí optimálně nastavit velikost tlaku, odstupu a také rychlosti posuvu kapiláry. Rychlost tak nesmí zpravidla být příliš velká a tlak relativně malý.

Dalším vhodným softwarovým řešením může být pozdržení kapiláry během tisku v jednom bodě nad inkriminovaným místem. Na obrázku 12.2 je patrné nespojení některých cest z důvodu velké rychlosti pohybu dispenseru nebo nedostatečného tlaku.



Obr. 12.2 Defekty tisku na vnějším rohu

Změna rychlosti a tlaku

Rychlost posuvu hrotu a tlak, který působí na píst v kapiláře, jsou dva velmi silně spjaté procesní parametry. Obecně platí, že čím vyšší tlak a nižší rychlost, tím větší množství tisknutého materiálu. Tak lze snadno překročit požadovanou maximální tloušťku nebo šířku vrstvy čáry. Naopak při nízkém tlaku a vysoké rychlosti pohybu kapiláry může dojít k vylití nedostatečného množství tisknuté pasty. Taková místa pak mohou být po výpalu oblastí nechtěného defektu.

Odstup hrotu od substrátu

Změnou výšky hrotu nad povrchem substrátu lze dosáhnout dvou rozdílných typů nanášení pasty. Při práci se jako nejlepší ukázala metoda, kdy je kapilára v dostatečně velké výšce a pohybuje se dostatečnou rychlostí na to, aby vytlačený materiál „vláčela“ za sebou. Pokud by však byl vzdálenost příliš malá, dojde tak k problému, který se při nakloněné rovině tisknutí a svislé kapiláře může objevit velmi snadno, kdy pohybu po hraně směrem dolů dojde ke kolizi natisknuté cesty s pohybujícím se hrotem.

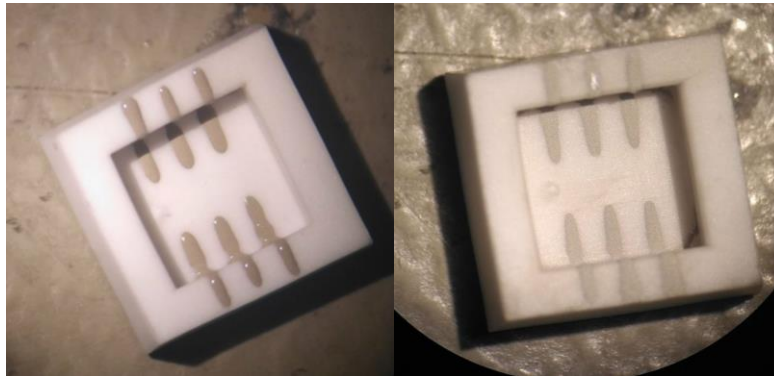
Počáteční a koncové body natisknutých čar

První a poslední body tisknutých křivek, jsou místa zvláště viditelná při změnách parametrů tisku uvedených výše. V počátečních bodech čar je třeba správně synchronizovat odstup hrotu od substrátu a tlak, aby se materiál nehromadil. V opačném případě, při nedostatku materiálu, dochází k tomu, že tisknutý materiál je nahromaděn na kapiláře a na místě prvního dotyku s pouzdrem se přichytí přemíra materiálu.

Na koncích čar může nastat problém zejména při tisku past s malou tekutostí. V tom případě je třeba, aby nedocházelo k posunu kapiláru před tím, než je z ní všechen materiál odstraněn. Pro manipulaci s těmito problematickými místy nabízí Robot Edit softwarové řešení v instrukcích Line Dispense, Dispense End Setup, nebo lze použít příkaz Dispense ON/OFF.

Výsledek testu dispensního tisku

Po testování viskozity pasty a úpravách parametrů tisku pomocí tlaku a softwaru bylo jako poslední krok pouzdro potisknuto tlustou vrstvou vodivou vrstvou. Po tisku bylo ještě vysušeno při teplotě 150°C po dobu 15ti minut a připraveno k výpalu. Na obrázku 12.3 je vlevo pouzdro s natisknutými cestami před jejich vysušením a vpravo po vysušení.



Obr. 12.3 Natisknutá vodivá vrstva před a po vysušení

ZÁVĚR

Cílem první části této práce bylo provést rešerši v oblasti technologie vytváření keramických pouzder pro mikroelektronické aplikace a seznámit se tak s problematikou pouzdření integrovaných obvodů, které se za posledních několik desítek let stává stále důležitějším faktorem pro kvalitu, spolehlivost a funkčnost elektronických součástek a zařízení napříč mikroelektronikou. Byl sestaven stručný návrh pouzdra a nastíněna byla problematika a požadavky elektrického návrhu pouzdra a jeho teplotní management

V úvodní kapitole jsou popsány již známé technologie a komponenty úzce související s funkcí samotného pouzdra. Představeny jsou zde typy zejména keramických typů pouzder, které mohou sloužit jako výchozí platforma nebo forma inspirace pro vlastní návrh pouzdra během následujícího pokračování této práce. Neméně důležitým bodem zadání bylo zaměření se na používané materiály, jejich složení a technologii výroby. Přehledně a stručně je zde přiblížena zejména oxidová keramika a její přední představitel v oblasti keramického pouzdření – oxid hlinitý, který byl použit jako výchozí materiál pro praktickou část této práce.

V části druhé byl proveden technologický postup výroby pouzdra z korundové keramiky. Precizním lisováním a následným tvarováním frézou byly zhotoveny první prototypy, pro které byl sestaven teplotní profil a které byly nakonec vypáleny ve vypalovací peci ST – 1700 MX – I. Nad zhotovenými vzorky byla provedena inspekce defektů pouzder vysoce účinnými metodami rentgenové tomografie a elektronového mikroskopu.

S již vypálenými pouzdry byl jako poslední krok proveden test dispensního tisku. Pro účely práce byl vyroben držák. Vodivá pasta Paron W-38 byla tisknuta dispensním robotem Fisnar 4200N, který byl ovládán pomocí softwaru Smart Robot Edit, ve kterém byl pro automatizaci vytvořen výsledný program. Celý proces dispensního tisku probíhal z důvodu možnosti přístupu kapiláry ke všem stranám pouzdra najednou metodou nanášení pasty pod úhlem 45°. Ta se ukázala být pro optimalizaci náročnější než tisk svislou kapilárou na vodorovný substrát, zejména v oblastech hran, nicméně při správném nastavení parametrů lze tak běžná čtvercová pouzdra tisknout efektivněji.

Literatura

- [1] VALENTA, Ladislav. *Keramická příručka – Silikátový svaz ČR*. Vyd. 2, Tisk: Grafotechna print s.r.o ISBN 978-80-86821-46-7, prosinec 2007
- [2] TUMMALA, Rao R.; RYMASZEWSKI, Eugene J.; KLOPFENSTEIN, Alan G.. *Microelectronics Packaging Handbook Technology Drivers*, part 1. Second edition. nakladatelství sprinter science business media, b.v. .
- [3] DATTA, M; OSAKA, T.; SCHULTZE, J.W.. *Microelectronic packaging, New Trends in Electrochemical Technology*. 2016. Nakladatelství CRC PRESS LCC
- [4] Cube CZ, [online]. Dostupné z: <http://www.cube.cz/technical-capabilities/universal-pad-finish-ang.htm?lang=en>
- [5] Microtek, [online]. Dostupné z: <http://www.utekinc.com/flip-chip-assembly/>
- [6] Nexperia Products,[online]. Dostupné z: <https://www.nexperia.com/products/logic>
- [7] SZENDIUCH, Ivan. *Pouzdrění v Elektrotechnice - substráty, tepelný management a moderní typy*, [online]. Brno, Ústav Mikroelektroniky, Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty(Bc).pdf)
- [8] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronika a technologie součástek*, [online]. Brno, Ústav Mikroelektroniky, Brno, 11.11. 2003, Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/MMTE_P.pdf
- [9] OTÁHAL, Alexandr. *Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN*, [online]. Brno, Ústav Mikroelektroniky, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/8349/BGA_QFN_xotaha00.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] MALČÍK, Dominik. *Mikroskopická analýza bezpečnosti čipů*, [online]. Brno 2011, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav inteligentních systémů. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=117921
- [11] SKÁCEL, Josef. *Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN*, [online]. Brno, Ústav Mikroelektroniky, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102575
- [12] Quik – Pak. *Ceamic IC Packages, Microelectronic Packaging and Assembly Solutions*, 2013 [online]. Dostupné z: <http://www.icproto.com/capabilities-services/ic-packages/ceramic/>
- [13] OVČAČÍKOVÁ, Hana. VLČEK, Jozef. *SPECIÁLNÍ KERAMICKÉ MATERIÁLY (studijní opory)*, [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2013, Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/specialni-keramicke-materialy/Ovcacikova_Specialni-keramicke-materialy.pd

- [14] Nabaltec, Granaloc Ceramic Bodies, 2015, [online]. Dostupné z: http://www.nabaltec.de/download/produkte/Granalox_NM96xx_Datasheet_EN.PDF
- [15] Al Lewis, Asymtek A Nordson Company, (9.3.2014). Dostupné z WWW: <http://www.nordson.com/en-us/divisions/adhesive-dispensing/support/Literature/Pages/PublishedArticles.aspx>
- [16] ElectroScienceThick-Film Materials & Ceramic Tapes, 2012, (6.7.2013) dostupné z WWW: <http://www.electroscience.com/products.html>
- [17] BURŠÍK, M.; SZENDIUCH, I.; HLADÍK, J. *Deposition of Thick Film Fine Line Patterns by Direct Writing*. 42nd IMAPS 2009. San Jose, USA, IMAPS USA. 2009. p. 10 - 14.
- [18] PITT, Ed by Keith. *Handbook of thick film technology*. 2. ed. Port Erin, Isle of Man, UK: Electrochemical Publ, 2005, 379 s. ISBN 09-011-5042-8.
- [19] PITT, By Malcolm Haskard, *Thick-film technology and applications*. Vyd. 1. Port Erin, Isle of Man, UK: Electrochemical Publ, 1997, 379 s. ISBN 09-011-5035-5.
- [20] SMART Robot Edit software manual, Fisnar 4200N Series
- [21] KOSTYTSYN, M. A., D. S. MURATOV, D. V. LYSOV, K. O. CHUPRUNOV, A. G. YUDIN and D. V. LEYBO. 2016. Corundum ceramic materials modified with silica nanopowders: structure and mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 112, 012010-.
- [22] TRINCA, D., Y. and J. ROYUELA-DEL-VAL. 2017. Fast correction of analytical reconstructions in sparse view X-ray computed tomography. *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*. , 1109-1115.
- [23] SZENDIUCH, Ivan. *Základy a technologie mikroelektronických obvodů a systémů*, tisk Akademické nakladatelství VUTIUM, ISBN 8021432926, 2006.
- [24] Fisnar Products, [online]. Dostupné z: <https://www.fisnar.com/products/robotics/benchtop-robots/f4200n-1-compact-benchtop-robot/>
- [25] CeramTec, [online]. Dostupné z <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/>